



RESUMEN

En la presente monografía se desarrolló el tema enfocado a los aspectos teóricos sobre el **Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método SUPERPAVE**.

Se seleccionaron dos métodos tradicionales para el diseño, a saber; el Método Marshall y el Método Hveem, los cuales han sido comparados con un método en desarrollo denominado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements), toda la información recopilada ha sido utilizada para emitir las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

El trabajo realizado será en lo posible de utilidad, para la solución de los diferentes problemas relacionados con la falta de calidad de asfalto en nuestro país, por lo que se exponen algunas semejanzas y diferencias entre los métodos seleccionados.

También se dan criterios sobre el control de calidad de los diferentes materiales utilizados en el diseño y durante su puesta en obra, ya que es uno de los aspectos más importantes durante el diseño de mezclas asfálticas.

Palabras Claves: Método SUPERPAVE, Método Marshall, Método Hveem, Mezclas Asfálticas.



ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO:	PÁG.
1. Generalidades	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Objetivos	12
1.3 Recopilación de Información de los Métodos de Diseño de las Mezclas Asfálticas	12
1.3.1 Las mezclas asfálticas.....	12
1.3.2 La Mezcla Asfáltica en Caliente	13
1.3.3 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente	13
1.3.4 Diseño de mezclas asfálticas en el Ecuador	15
1.4 Normas de Diseño (MTOPE).....	16
2. Materiales Constituyentes de la Mezcla Asfáltica	17
2.1 Material Asfáltico.....	17
2.1.1 Cemento Asfáltico.....	17
2.2 Agregados Pétreos	22
2.2.1 Propiedades de los agregados pétreos	22
2.3 Aditivos	25
2.3.1 Aditivos Poliméricos.....	25
2.3.2 Aditivos No Poliméricos	25
3. Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas	27
3.1 Método Marshall.....	28
3.1.1 Granulometría.....	29
3.1.2 Especificaciones del método	29
3.1.3 Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño	31
3.1.4 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas.....	33
3.2 Método SUPERPAVE.	35
3.2.1 Especificaciones del método	36
3.2.2 Algoritmo de Diseño	37
3.2.3 Estudio y Selección de los Materiales.	38
3.3 Método Hveem.....	49
3.3.1 Procedimientos de diseño	51
3.3.2 Procedimiento del ensayo.....	52



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

3.4	Parámetros Volumétricos	55
3.4.1	Definiciones	55
3.5	Semejanzas y Diferencias entre los métodos.	61
3.5.1	Diferencias	62
3.5.2	Semejanzas	63
4.	Aplicación Práctica de los Métodos de Diseño.	64
4.1	Métodos de Diseño Marshall y SUPERPAVE	64
4.1.1	Caracterización de los materiales	64
4.1.2	Elaboración de la mezcla asfáltica	65
4.1.3	Pruebas a las mezclas asfálticas	71
4.1.4	Resultados	74
4.2	Método de Diseño Hveem	78
4.2.1	Evaluación del Transito	78
4.2.2	Análisis de los espesores del pavimento	80
5.	Control de Calidad.	83
5.1	Materiales	83
5.1.1	Ensayos al agregado mineral	83
5.1.2	Ensayos al cemento asfáltico.	88
5.2	Construcción	92
5.2.1	Ensayos a la mezcla asfáltica	92
5.2.2	Proceso constructivo	93
6.	Conclusiones y Recomendaciones.	101
6.1	Conclusiones	101
6.2	Recomendaciones	102
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Productos y Temperaturas típicas de Destilación (Principios de la Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente. MS-22, Asphalt Institute.)	18
Figura 2: Refinamiento del Petróleo	19
Figura 3: Comportamiento Real del Asfalto	19
Figura 4: Características del Flujo de Líquidos	20
Figura 5: Especímenes (Briquetas) para ensayar en prueba Marshall.....	29
Figura 6: Prensa de carga.....	34
Figura 7: Algoritmo de diseño SUPERPAVE.....	37
Figura 8: Ilustración de cómo se grafican las abscisas	42
Figura 9: Graduación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm.....	42
Figura 10: Límites para las granulometrías Superpave (Gráfica de Fuller)	43
Figura 11: Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC).....	46
Figura 12: Determinación del espesor de equilibrio	50
Figura 13: Valor de R.....	51
Figura 14: Estabilómetro.....	52
Figura 15: Equipo de prueba de cohesión	54
Figura 16: Equipo de prueba de expansión	55
Figura 17: Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico	56
Figura 18: Componente del diagrama de compactación de una Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA)	57
Figura 19: Diferencias entre los métodos Marshall y SUPERPAVE	62
Figura 20: Carta de viscosidad.....	65
Figura 21: Granulometría Marshall	66
Figura 22: Granulometría SUPERPAVE.....	66
Figura 23: Preparación del agregado.	68
Figura 24: Vaciado de la mezcla al molde (Izq. SUPERPAVE y Der. Marshall).....	68
Figura 25: Datos generales y grafica en el compactador Servopac	69
Figura 26: Colocación del molde	69
Figura 27: Compactación Marshall	70
Figura 28: Extracción: SUPERPAVE y Marshall	70
Figura 29: Picnómetro de Vacío	71
Figura 30: Determinación de las masas de las mezclas asfálticas.....	72
Figura 31: Gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto (Marshall) ..	76
Figura 32: Gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto (SUPERPAVE)	77
Figura 33: Espesor por presión de expansión y Presión de exudación	81
Figura 34: Espesor de grava equivalente.....	81
Figura 35: Ensayo angularidad agregado fino.....	84
Figura 36: Ensayo equivalente de arena	86
Figura 37: Esquema del ensayo de penetración	88
Figura 38: Horno RTFOT	89
Figura 39: Equipo para el ensayo de presión de envejecimiento Vessel.....	90



LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)	30
Tabla 2: Criterio de diseño de mezclas Marshall	30
Tabla 3: Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)	31
Tabla 4: Niveles de Análisis Método SUPERPAVE.....	36
Tabla 5: Equipos para determinar Propiedades Físicas del Asfalto.....	38
Tabla 6: Rangos para el grado PG	39
Tabla 7: Puntos de control y zonas restrictivas	44
Tabla 8: Graduaciones para mezcla Superpave	44
Tabla 9: Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19 mm	45
Tabla 10: Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm	45
Tabla 11: Valores de los parámetros	46
Tabla 12: Esfuerzo de compactación giratoria para el diseño SUPERPAVE	46
Tabla 13: Criterio para VAM.....	47
Tabla 14: Criterio para VFA.....	47
Tabla 15: Pruebas al agregado mineral	64
Tabla 16: Pruebas adicionales al agregado mineral	65
Tabla 17: Resultados del reómetro de corte directo	65
Tabla 18: Especificación SUPERPAVE.....	69
Tabla 19: Análisis de las granulometrías para el método SUPERPAVE	75
Tabla 20: Análisis de la granulometría para el método Marshall	75
Tabla 21: Comparación de los parámetros volumétricos estimados	77
Tabla 22: Comparación de los parámetros volumétricos reales	78
Tabla 23: Factores de equivalencia	79
Tabla 24: Análisis de tránsito	79
Tabla 25: Factor de grava	82
Tabla 26: Requerimiento angularidad áridos gruesos.....	84
Tabla 27: Requerimientos angularidad del agregado fino.....	85
Tabla 28: Requerimientos partículas alargadas y planas.....	85
Tabla 29: Requerimientos equivalente de arena	86



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Walter Pedro Chimborazo Morocho, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Walter Chimborazo
0301840641



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Walter Pedro Chimborazo Morocho, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

A handwritten signature in blue ink, enclosed in an oval shape. The signature is stylized and appears to read "Walter Chimborazo".

Walter Chimborazo
0301840641



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

UNIVERSIDAD DE CUENCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



“Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método SUPERPAVE”

Monografía previa a la obtención
del Título de Ingeniero Civil

Director:

Ing. Jaime Bojorque I.

Autor:

Walter Pedro Chimborazo Morocho

CUENCA – ECUADOR

2012



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

DEDICADO A:

Dios.

Por acompañarme en todo momento y lugar, guiándome en el camino del bien y llevar a feliz término mis estudios.

Mis padres.

Pecho Chimborazo y María Tráncito Morocho Tenesaca, por su amor, apoyo incondicional y ser ejemplo de superación profesional.

Mi hermano y mis hermanas.

Daquilema José, Tráncito María y Tamia Sisa, por su cariño y apoyo en todo momento.

Mi sobrinito.

Alexis Leonel Chimborazo Quituisaca y su querida madre Lidia Quituisaca por ser fuente de inspiración y fortaleza.

Mis amigos.

Por estar siempre presentes ayudándome a ser mejor persona cada día.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

AGRADECIMIENTO A:

Dios.

Por darme la salud, sabiduría y entendimiento para alcanzar este objetivo.

Mis padres.

Por su apoyo moral e incondicional, y darme la oportunidad de educación desde mi infancia.

Mis hermanos.

Por estar siempre conmigo apoyándome siempre en la realización de mis sueños e ideales.

Mis amigos.

Por su amistad, sus consejos y por pasar buenos momentos.

La Facultad de Ingeniería.

Por ser fuente de conocimiento y de la creación de nobles ideales.

El Ing. Jaime Bojorque I.

Por el asesoramiento en el trabajo de Graduación.



**DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL MÉTODO
“SUPERPAVE” (SUperior PERforming Asphalt PAVement).**

CAPÍTULO I.

1. Generalidades.

1.1 Introducción.

“En nuestro país, la calidad de mezclas asfálticas para pavimentos flexibles presenta algunas consideraciones, las mismas que después de haber sido colocadas al cabo de poco tiempo se presenta un deterioro considerable, provocando la destrucción de los pavimentos. Esta realidad nacional ha causado enormes perjuicios al estado ecuatoriano, por el hecho de tener que realizar trabajos de rehabilitación tempranos para brindar un mejor servicio a los usuarios de las vías.

También, se debe considerar que no se ejecutan trabajos de mantenimiento vial de una manera adecuada y en tiempos adecuados, razón por la cual muchas de las vías se encuentran en muy mal estado, esta falta o carencia de administración vial, obliga a que en la primera fase, las mezclas asfálticas para pavimentos flexibles se encuentren dentro de parámetros que obliga la norma.”
[1]

El deterioro de un asfalto es un proceso que comienza inmediatamente después de su construcción. Las causas del deterioro son las sollicitaciones externas producidas por el tráfico y los agentes climáticos. Sin embargo, la tasa y tipo de deterioro que experimenta un asfalto dependen de la intensidad en que se manifiestan las sollicitaciones (tránsito y clima) y de una serie de otros factores de proyecto que actúan en muy diversas combinaciones, entre cuales los más importantes son: calidad del diseño original, calidad de los materiales y especificaciones técnicas, calidad del proceso constructivo y calidad del control del proceso.

En la actualidad, el Ministerio de Transporte y Obras Públicas ha entregado las vías del Ecuador a empresas autónomas (concesionarias) las que se encargarán de su mantenimiento, y la recuperación de su inversión será a través del cobro de peajes, el inversionista por lo tanto demanda buen servicio y producto de calidad.

Por esta razón, se hace necesario el presente trabajo a fin de analizar la utilización de una nueva metodología en la producción de mezcla asfáltica conocida como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements), ya que éste servirá para el mejoramiento en la construcción vial.

El trabajo a realizar será en lo posible de utilidad, para la solución de los diferentes problemas relacionados con la falta de calidad de asfalto en nuestro país, por lo que se expondrán algunas conclusiones y recomendaciones que



permitirán mejorar el diseño de la mezcla asfáltica.

1.2 Objetivos.

Para el presente trabajo se han establecido los siguientes objetivos:

- + Analizar la Metodología SUPERPAVE y su aplicación en las carreteras del país.
- + Establecer diferencias entre los métodos tradicionales más usados y el método SUPERPAVE.
- + Establecer ventajas y desventajas de la utilización de la metodología SUPERPAVE en la aplicación de las carreteras del país, en relación a los métodos tradicionales.

1.3 Recopilación de Información de los Métodos de Diseño de las Mezclas Asfálticas. [2]

1.3.1 Las mezclas asfálticas.

Están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan.

Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesados intensos.

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

Las mezclas asfálticas han sido típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, lo que significa que se requiere la experiencia en campo para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aun con la correcta unión de estos procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se podían asegurar buenos grados de desempeño.

Las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los vehículos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura, es decir proporciona una superficie de rodadura cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos cuando se emplean en



capas superficiales.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores, temperatura y duración de la carga.

Las cualidades funcionales residen fundamentalmente en su superficie. De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen:

- + La adherencia del neumático al firme.
- + La cantidad de agua en tiempo de lluvia.
- + El desgaste de los neumáticos.
- + El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- + La comodidad y estabilidad en marcha.
- + Las cargas dinámicas del tráfico.
- + La resistencia a la rodadura.
- + El envejecimiento de los vehículos.
- + Las propiedades ópticas.

Estos aspectos funcionales están principalmente asociados con la textura y la regularidad superficial del pavimento. Se puede decir que en una mezcla asfáltica, en general, hay que optimizar las propiedades siguientes: Estabilidad. Durabilidad y Resistencia a la fatiga. Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes: Resistencia al deslizamiento, Regularidad, Permeabilidad adecuada, Sonoridad y Color.

1.3.2 La Mezcla Asfáltica en Caliente.

Constituye el tipo más generalizado de mezcla asfáltica y se define como mezcla asfáltica en caliente la combinación de un ligante hidrocarbonado, agregados incluyendo el polvo mineral y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del agregado queden muy bien recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los agregados (excepto, eventualmente, el polvo mineral de aportación) y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.

Se emplean tanto en la construcción de carreteras, como de vías urbanas y aeropuertos, y se utilizan tanto para capas de rodadura como para capas inferiores de los firmes.

1.3.3 Evolución de los diseños de mezclas asfálticas en caliente.

A continuación se presenta la evolución de los métodos de diseños de mezclas



asfálticas en caliente, según [2].

The Hubbard-Field (1920's).- Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.

Método Marshall (1930's).- Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la segunda Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.

Método Hveem (1930's).- Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.

Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials, WASHTO (1984).- Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia del carril.

Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987).- La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

Método SUPERPAVE (1993).- El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene un resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.



1.3.4 Diseño de mezclas asfálticas en el Ecuador.

“En nuestro país, el desarrollo de la técnica de diseño de pavimentos ha tenido un proceso que ha ido paralelo con el avance en el conocimiento de la mecánica de suelos y el comportamiento de los materiales de construcción. Los métodos de diseño involucran los conocimientos teóricos que explican matemáticamente la interacción de los factores de diseño, introduciendo simplificaciones de orden empírico, que permiten simples y confiables resultados.

La utilización del pavimento flexible, dentro de las diferentes posibilidades de uso de materiales y técnicas de construcción, así como por los bajos costos, ha hecho que se generalice su uso. Las variables que intervienen en el diseño de un pavimento flexible son múltiples e interrelacionadas, que deben ser debidamente analizadas en el desarrollo de un proyecto, entre las principales tenemos: estructurales, de carga, servicio, factores regionales de clima, variables de mantenimiento, comportamiento y criterios de decisión.

Un método de diseño confiable será aquel que establezca una adecuada interacción de todos los factores señalados y el diseño estructural, sea cual fuere el tipo de pavimento. Todos los métodos de diseño han sido desarrollados a base de la investigación permanente de todos aquellos factores de tipo local o regional que en forma experimental han sido determinados, para luego utilizarlos en modelos matemáticos y/o ábacos que se emplean en el diseño.

Dentro de los métodos más conocidos en nuestro medio podemos señalar:

- + Método desarrollado por la American Association Of State Highway y Officials, AASHTO.
- + Método del Instituto de Asfaltos de los Estados Unidos.
- + Método del Valor Soporte California CBR.
- + Método del Índice de Grupo.
- + Método Marshall.

En el Ecuador no se ha desarrollado método alguno que sea el resultado de la investigación de las condiciones locales, de tal manera que en forma adecuada se tome en cuenta la interacción de las variables de diseño y los criterios de decisión que permitan llegar a soluciones adecuadas con las condiciones del país; ésta es la razón para que no tenga validez alguna el describir teóricamente cualesquiera de los métodos señalados, limitándonos a describir aquel que ha sido oficializado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), que corresponde al Método AASHTO, aplicado al Ecuador.”[3]

Para el presente trabajo se considerarán tres métodos de diseño: Marshall, Hveem y SUPERPAVE, con los cuales se hará una descripción de cada



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

método y se presentará tanto sus ventajas como sus desventajas de cada uno de los métodos.

1.4 Normas de Diseño (MTO).

La fiscalización de un proyecto vial en el Ecuador podrá aprobar una carpeta asfáltica siempre y cuando esta cumpla con las exigencias según lo estipulan las **ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES MOP 001-F-2002**, en su **CATÍTULO 400: ESTRUCTURAS DEL PAVIMENTO**.



CAPÍTULO II.

2. Materiales Constituyentes de la Mezcla Asfáltica. [4]

Es evidente que la calidad de los materiales que conforman una obra vial, es determinante para la sección de la estructura del pavimento más adecuada técnica y económicamente. Por una parte se consideran los agregados disponibles en depósitos aluviales y canteras del área. Además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, hay que atender las cantidades disponibles, al suministro y al precio, condicionado en gran medida por la distancia de transporte. Por otro lado, se consideran los materiales básicos de mayor costo como son los ligantes y conglomerantes principalmente.

2.1 Material Asfáltico.[5]

El asfalto es uno de los materiales más antiguos utilizados como impermeabilizante. Los asfaltos naturales se encuentran en depresiones de la corteza terrestre formando los lagos de asfalto o aparecen impregnados en calizas, formaciones de areniscas o similares, formando las llamadas rocas asfálticas, también se encuentran mezclados por impurezas minerales.

Durante 1800 y 1900 la demanda de las carreteras pavimentadas se incrementó tan rápido que la extracción y transporte desde los lagos de asfalto hasta la obra, fue limitando la construcción de estos pavimentos. Se tuvo que considerar otra fuente para producir asfalto, es así que la mayoría de los asfaltos utilizados en la actualidad son provenientes del refine del petróleo.

2.1.1 Cemento Asfáltico.

La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) lo define como un material cementante, de color oscuro y de consistencia variable, cuya rigidez depende de la temperatura en que se encuentre. A temperatura ambiente el asfalto es sólido a semisólido, y cuando su temperatura se eleva (135°C) se vuelve líquido, esta condición permite que los agregados sean cubiertos completamente, durante la mezcla.

El cemento asfáltico también es usado como impermeabilizante y no es afectado por los ácidos, los álcalis (bases) o las sales. Esto significa que un pavimento de concreto asfáltico construido adecuadamente es impermeable y resistente a muchos tipos de daño químico.

El asfalto al entrar en contacto con el oxígeno del medio ambiente reacciona, perdiendo sus propiedades elásticas y volviéndose duro y frágil. Esta es una de las características del asfalto que trata de retardarse, pero que se desarrolla con el tiempo.



En una mezcla convencional (asfalto + agregado de granulometría completa) el porcentaje de asfalto es de 6.5% y del agregado de 93.5% en peso de la mezcla, aprox.; sin embargo, es importante resaltar como un material cuya participación es mínima puede tener tanto efecto en el comportamiento de la mezcla.

2.1.1.1 Refinamiento del petróleo.

Mediante el incremento paulatino de temperatura el crudo del petróleo se descompone liberando los solventes más livianos, como la gasolina, el kerosene y el diesel. Para separar los destilados más pesados, no solo es necesario incrementar la temperatura sino someterlo a vacío. Luego de un periodo de tiempo se obtendrá el cemento asfáltico. En la Figura 1 se muestra la temperatura a la cual los solventes se van separando del crudo del petróleo. En la Figura 2 hay un esquema del proceso de refine del petróleo.

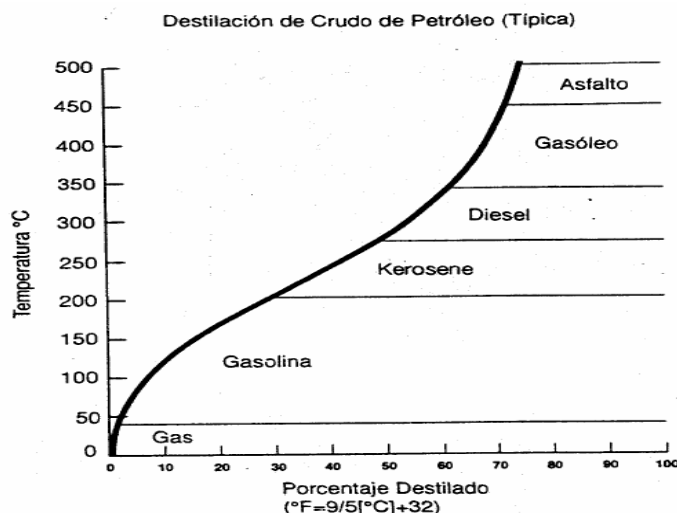


Figura 1: Productos y Temperaturas típicas de Destilación (Principios de la Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente. MS-22, Asphalt Institute.) [5]

Si el cemento asfáltico se combina con algún solvente se obtienen los asfaltos diluidos o cutbacks. Así, si el asfalto se combina con gasolina será asfalto de curado rápido (Rapid Cured, RC), si se combina con kerosene será de curado medio (Medium Cured, MC) y con diesel del curado lento (Slow Cured, SC).

Si el cemento asfáltico se combina con agua y un agente emulsificante se obtienen los asfaltos emulsificados. Tanto en el caso de asfaltos diluidos como de asfaltos emulsificados, el objetivo es darle trabajabilidad al cemento asfáltico. Puesto que en esta condición los asfaltos pueden trabajarse a temperaturas que van de 60° a 20°C, respectivamente. Luego de la colocación de la mezcla el solvente o el agua se evaporará y quedará el asfalto solo. Por lo tanto es importante conocer el comportamiento mecánico del cemento asfáltico.

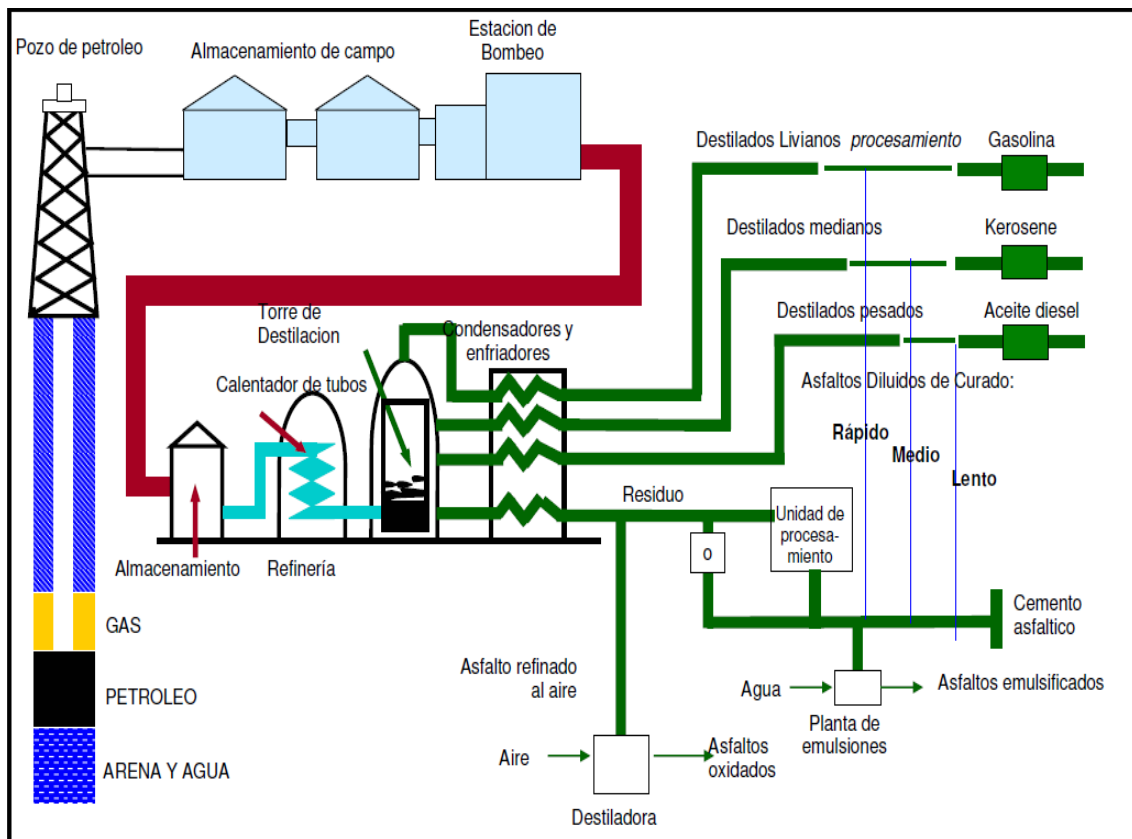


Figura 2: Refinamiento del Petróleo. [5]

2.1.1.2 Comportamiento mecánico del Cemento Asfáltico.

La naturaleza del asfalto es viscoelástica, esto quiere decir que su comportamiento depende de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. El asfalto a altas temperaturas tiene menor rigidez, típico durante la temperatura de mezcla (135°C). A medida que la temperatura descende el asfalto se vuelve más rígido. A temperaturas muy bajas el asfalto puede agrietarse porque se vuelve frágil y quebradizo, esto se muestra en la Figura 3.

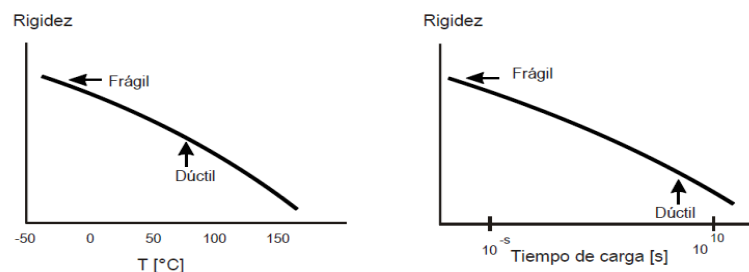


Figura 3: Comportamiento Real del Asfalto. [5]

Un comportamiento análogo se observa cuando se grafica el tiempo de aplicación de la carga (velocidad) y la rigidez. Cuando las cargas aplicadas son



rápidas el asfalto tiene mayor rigidez y cuando las cargas son lentas hay menor rigidez y mayor deformación, ver Figura 3.

2.1.1.3 Comportamiento a altas temperaturas.

En climas cálidos o sometidos a cargas de tráfico lentas (intersecciones, tramos en pendiente), el cemento asfáltico se comporta como un líquido viscoso, dejando que el agregado soporte las cargas cíclicas. Con esta condición la estructura granular de la mezcla asfáltica cumple un papel muy importante. El asfalto solo es el aglutinante.

Por definición, la viscosidad es la característica física del material que describe la resistencia de los líquidos a fluir. Si el flujo del cemento asfáltico en caliente es lento puede ser observado microscópicamente como capas adyacentes de moléculas deslizándose unas sobre otras. La resistencia o fricción entre capas se relaciona a la velocidad relativa de deslizamiento.

La viscosidad es una característica que ayuda a diferenciar a los líquidos y se define como el esfuerzo de corte entre la velocidad de deformación por corte. La Figura 4 muestra un juego de cartas que tienen una línea vertical marcada a un lado. Cuando se aplica el corte en el punto superior, las cartas tratan de deslizarse una sobre la otra y los puntos marcados en las cartas empiezan a separarse. La velocidad al corte es la velocidad a la cual estos puntos se separan.

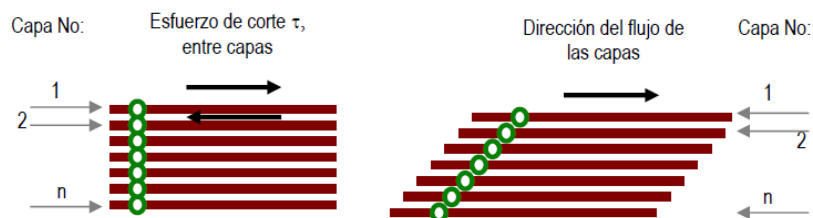


Figura 4: Características del Flujo de Líquidos. [5]

Los fluidos Newtonianos tienen una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad relativa. El aire, agua y asfalto caliente (a temperaturas mayores que 60°C) son comúnmente fluidos Newtonianos. A temperaturas moderadas, la viscosidad del asfalto decrece cuando la velocidad relativa se incrementa.

Los líquidos viscosos como el asfalto caliente algunas veces son llamados plásticos porque una vez que empiezan a fluir no retornan a su posición original. El rutting o ahuellamiento es la acumulación de deformaciones plásticas no recuperables.

2.1.1.4 Comportamiento a bajas temperaturas.

En climas fríos o bajo aplicaciones de carga rápida, el cemento asfáltico se



comporta como un sólido elástico. Los sólidos elásticos son como ligas porque cuando cesa la carga que los deforma, regresan a su posición original.

Si el material se esfuerza más allá de su capacidad, el sólido elástico puede romperse. El agrietamiento por bajas temperaturas algunas veces ocurre en los pavimentos cuando están sometidos a climas fríos. En estos casos, las cargas aplicadas producen esfuerzos internos que se acumulan en el pavimento asfáltico que tenderá a contraerse mientras su movimiento es restringido por las capas inferiores.

2.1.1.5 Comportamiento a temperaturas intermedias.

En estos climas el asfalto muestra características de líquido viscoso y sólido elástico. A estas temperaturas, el asfalto es un excelente material adhesivo usado en pavimentación.

Cuando se calienta el asfalto actúa como un lubricante, permitiendo mezclarse con el agregado, cubrirlo y compactarse formando una superficie lisa y densa. Tan pronto como se enfría, el asfalto actúa manteniendo juntos los agregados en la matriz sólida. En esta etapa el comportamiento del asfalto es viscoelástica, es decir, tiene características elásticas y viscosas, dependiendo de la temperatura y velocidad de aplicación de carga.

2.1.1.6 Comportamiento del ligante envejecido.

Como el cemento asfáltico está compuesto por hidrocarburos (combinación de hidrógeno y carbono) y nitrógeno, oxígeno y otros elementos. El asfalto cuando se disuelve en heptano se descompone en asfaltenos y maltenos.

Los asfaltenos le proporcionan al asfalto el color y rigidez. Los maltenos son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar y pardo oscuro, mientras que los aceites son de color más claro.

Las resinas le otorgan las cualidades adhesivas al asfalto, mientras que los aceites son el medio de transporte de asfaltenos y resinas.

Durante la reacción con el oxígeno del medio ambiente, esto ocurre principalmente cuando el asfalto tiene elevadas temperaturas o cuando una película delgada de asfalto recubre la partícula. Las resinas se convierten gradualmente en asfaltenos y los aceites en resinas, ocasionando así un incremento en la rigidez del asfalto. Esta reacción se denomina oxidación. La oxidación cambia la estructura y composición de las moléculas de asfalto haciéndolo más frágil o quebradizo.

La inapropiada compactación puede generar oxidación o endurecimiento prematuro. En estos casos, los inadecuados niveles de compactación tienen



altos porcentajes de vacíos de aire interconectados, que permiten que más aire o el agua penetren en la mezcla acelerando la oxidación.

2.2 Agregados Pétreos.

Agregado, también conocido como roca o material granular, es cualquier material mineral duro e inerte usado, en forma de partículas gradadas o fragmentos, como parte de un pavimento de mezcla asfáltica en caliente. Los agregados típicos incluyen arena, grava, piedra triturada y polvo de roca.

El agregado constituye entre el 90 y el 95 por ciento, en peso, y entre el 75 y el 85 por ciento, en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante.

La gradación de la combinación de agregados es uno de los aspectos primordiales en el comportamiento mecánico e hidráulico de una mezcla asfáltica compactada.

2.2.1 Propiedades de los agregados pétreos.

Los agregados conforman entre el 90% y el 95%, en peso, de la mezcla de pavimentación; esto hace que la calidad del agregado usado sea un factor crítico en el comportamiento del pavimento. Sin embargo, además de la calidad, se aplican otros criterios que forman parte de la selección de un agregado de una obra de pavimentación.

Estos criterios incluyen el costo y la disponibilidad del agregado; aún más, un agregado que cumple con los requisitos de costo y disponibilidad deberá poseer también ciertas propiedades para poder ser considerado apropiado para pavimento asfáltico de buena calidad. Estas propiedades son:

- ✚ Gradación y tamaño máximo de partícula.
- ✚ Limpieza.
- ✚ Dureza.
- ✚ Forma de la partícula.
- ✚ Textura de la superficie.
- ✚ Capacidad de absorción.
- ✚ Afinidad con el asfalto.
- ✚ Peso específico.

Todas las especificaciones de pavimento asfáltico de mezclas en caliente requieren que las partículas de agregado estén dentro de un cierto margen de tamaños y que cada tamaño de partículas esté presente en ciertas proporciones.



Esta distribución de varios tamaños de partículas dentro del agregado es comúnmente llamada “gradación del agregado” o “gradación de la mezcla”.

2.2.1.1 Limpieza.

Las especificaciones de obra generalmente ponen un límite a los tipos y cantidades de materiales indeseables (vegetación, arcilla, partículas blandas, terrones de arcilla, etc.) en el agregado.

Las cantidades excesivas de éstos materiales pueden afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento.

La limpieza del agregado puede determinarse usualmente por inspección visual, sin embargo, en el laboratorio, el ensayo de Equivalente de Arena es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz de 4.75mm, (No.4).

2.2.1.2 Dureza.

Los agregados deben ser capaces de resistir la abrasión y degradación durante la producción, colocación y compactación de la mezcla de pavimentación, y durante la vida de servicio del pavimento.

Los agregados que están en, o cerca de la superficie deben ser más duros (tener más resistencia) que los agregados usados en las capas inferiores de la estructura del pavimento. Esto se debe a que las capas superiores reciben los mayores esfuerzos y el mayor desgaste por parte de las cargas del tránsito.

El ensayo de Desgaste en La Máquina de Los Ángeles mide la resistencia de un agregado al desgaste y la abrasión.

2.2.1.3 Forma de la Partícula.

La forma de la partícula afecta la trabajabilidad de la mezcla de pavimentación durante su colocación, así como la cantidad de fuerza necesaria para compactar la mezcla a la densidad requerida.

La forma de la partícula también afecta la resistencia de la estructura del pavimento durante su vida útil. Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas.

El mejor entrelazamiento generalmente se da con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración. Muchas de las mezclas asfálticas de pavimentación contienen partículas angulares y redondas.



Las partículas gruesas (grandes) de agregado proporcionan la resistencia en el pavimento y provienen generalmente de piedra o grava triturada. Las partículas finas de agregado suministran la trabajabilidad necesaria en la mezcla y provienen generalmente de arenas naturales.

2.2.1.4 Textura superficial.

La textura superficial de las partículas de agregado es otro factor que determina no solo la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla de pavimentación, sino también las características de resistencia al desplazamiento en la superficie del pavimento. Una textura áspera, como la del papel de lija, aumenta la resistencia en el pavimento debido a que evita que las partículas se muevan con respecto a las otras, y a la vez provee un coeficiente alto de fricción superficial que hace que el movimiento del tránsito sea más seguro. Adicionalmente, las partículas de asfalto se adhieren más fácilmente a las superficies rugosas que a las superficies lisas.

El trituramiento produce texturas superficiales rugosas en las caras fracturadas, así como cambios en la forma de la partícula. No existe un método directo para evaluar la textura superficial. Es tan solo una característica, como la forma de la partícula, que está reflejada en los ensayos de resistencia y en la trabajabilidad de la mezcla durante la construcción.

2.2.1.5 Capacidad de absorción.

Todos los agregados son porosos, y algunos más que otros. La cantidad de líquido que un agregado absorbe cuando es sumergido determina su porosidad.

La capacidad de un agregado de absorber agua (o asfalto) es un elemento importante de información. Si un agregado es altamente absorbente, entonces continuará absorbiendo asfalto después del mezclado inicial, dejando así menos asfalto en la superficie para ligar las demás partículas de agregado. Debido a esto, un agregado poroso requiere cantidades muchos mayores de asfalto que las que requiere un agregado menos poroso.

2.2.1.6 Afinidad por el asfalto.

La afinidad de un agregado con el asfalto es la tendencia del agregado a aceptar y retener una capa de asfalto. Las rocas hidrofóbicas (repelen el agua) como las calizas y las dolomitas resisten los esfuerzos del agua por separar el asfalto de sus superficies; en cambio, los agregados hidrofílicos (atraen el agua) como los agregados silíceos (cuarcita y algunos granitos) tienen poca afinidad con el asfalto, por consiguiente tienden a separarse de las partículas de asfalto cuando son expuestos al agua, éstos agregados por ser susceptibles al desprendimiento deben ser usados con precaución.

Es necesario decir que un conocimiento completo de los materiales usados en



la mezcla asfáltica de pavimentación constituye una herramienta necesaria e indispensable para evaluar el comportamiento de la mezcla como tal una vez puesta en servicio.

2.3 Aditivos.

El uso de aditivos, tiene por objeto mantener y mejorar esencialmente la composición y rendimiento de la mezcla básica. Dicho aditivo debe ser de fácil aplicación, su costo no debe aumentar el costo general y no afectar la trabajabilidad de la mezcla.

El problema más común que surge al trabajar con mezclas asfálticas es la de adherencia, ya que se produce un desprendimiento de sus componentes. El agua penetra entre la capa asfáltica y la superficie de contacto del árido y por la mayor afinidad de este con el agua la unión se rompe.

Existen dos tipos de aditivos: Los Poliméricos y los No Poliméricos.

2.3.1 Aditivos Poliméricos.

Presentan una alta adhesividad con los áridos, por lo que son ideales para la aplicación en calles y de alta velocidad y carga. El transporte de este tipo de mezclas para obras de gran envergadura se efectúa con camiones estanque. Se recomienda mantener los estanques de almacenamiento a temperaturas no superiores a 180°C.

Estos aditivos mejoran las características reológicas, la elasticidad, la adherencia, la resistencia a la tracción y la susceptibilidad térmica. Entre los aditivos poliméricos tenemos: Los Polímeros Termoplásticos (Plastómeros) y los Cauchos Termoplásticos (Elastómeros).

2.3.2 Aditivos No Poliméricos.

Estos aditivos no necesitan condiciones especiales para su aplicación, en algunos casos el único requerimiento es un leve aumento en su temperatura de mezclado. El transporte para obras grandes se lo realiza en camiones estanques ($T < 170^{\circ}\text{C}$) con serpentines interiores y para obras pequeñas en tambores de almacenamiento. Siempre se debe tener los estanques limpios en la carga y descarga del material.

Entre los principales aditivos no poliméricos tenemos: Los Fillers, los Rejuvenecedores, los Antioxidantes/Oxidantes, los Anti-Strip y los Retardadores de Fuego.

✚ **Filler.-** Son sustancias finamente divididas, insolubles en asfalto pero pueden ser dispersados en él, son agregados como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia de la mezcla. El efecto principal



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

del Filler es endurecimiento y aumento de la mezcla asfáltica. Son naturales y minerales, entre los Fillers minerales tenemos la cal, cemento, limos, polvo de tiza, polvo de roca, sulfuros y cenizas de combustible pulverizada.

- + **Rejuvenecedores.-** Estos rompen los enlaces oxidados y los enlaces estéricos secundarios. El principal es el hidrocarburo liviano (Alcano).
- + **Antioxidantes/Oxidantes.-** Los antioxidantes desaceleran la rigidez de la mezcla asfáltica (Sales de carbono y Sales de calcio) y los oxidantes aceleran la rigidez de la mezcla asfáltica (Sales de manganeso).
- + **Anti-Strip.-** Mejoran la adhesión, cambian la carga superficial del agregado y proveen la adherencia mecánica, como los limos, cemento y las aminas.
- + **Retardadores de Fuego.-** Los recomendados son los hidrocarburos clorinados en unión con óxido de antimonio, trifeníl fosfato, cloruro de zinc, bórax, sulfato de amonio.

En general con el uso de aditivos se quiere lograr principalmente: aumentar la adherencia en la mezcla asfáltica, disminuir la susceptibilidad térmica, disminuir la susceptibilidad a las aplicaciones de carga, aumentar la resistencia a deformaciones y aumentar la mezcla asfáltica.



CAPÍTULO III.

3. Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas.

“El factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Al respecto, las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada son los vacíos de aire (VA); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA); y contenido de asfalto efectivo (Pbe). Son los que proporcionan una idea del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

Con el desarrollo de la metodología Superpave y la aparición del compactador giratorio, la práctica actual de diseño de mezclas asfálticas en caliente se encuentra en una etapa de redefinición, de ahí la importancia de la comparación contra el método Marshall y Hveem. Cada método contiene características y ventajas singulares, por lo que cualquiera puede ser usado con resultados satisfactorios.

La selección del contenido óptimo debe ser un compromiso para seleccionar de manera balanceada todas las propiedades de la mezcla. Normalmente, los criterios de diseños de mezclas producirán un rango limitado de contenidos aceptables de asfaltos que pasen todos los lineamientos.” [6]

El análisis de la mezcla está enfocado en los siguientes aspectos:

Características y Comportamiento de la Mezcla.- Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento. El análisis está enfocado hacia las características de la mezcla y la Influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la misma.

- + Densidad de la mezcla.
- + Vacíos de aire, o simplemente Vacíos.
- + Vacíos en el agregado mineral – VMA.
- + Vacíos llenos de Asfalto – VFA.
- + Contenido de asfalto.
- + Estabilidad.
- + Fluencia.

Propiedades consideradas en el diseño de mezclas.- Estos son:

- + **Estabilidad.-** Es la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Depende de la fricción y de la cohesión interna.
- + **Durabilidad.-** La durabilidad de un pavimento asfáltico es su habilidad para resistir factores tales como la desintegración del agregado, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- + **Impermeabilidad.-** Es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior o a través de él.



- + **Trabajabilidad.-** Es la facilidad con que una mezcla puede ser colocada y compactada. Las mezclas gruesas tienen tendencia a segregarse durante su manejo y también pueden ser difíciles de compactar.
- + **Flexibilidad.-** Es la capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- + **Resistencia a la Fatiga.-** Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Los vacíos relacionados con el contenido de asfalto y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga.
- + **Resistencia al Deslizamiento.-** Es la habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada.

Características que debemos obtener en la mezcla.- Entre las más importantes tenemos:

- + Dosificación óptima de la mezcla asfáltica para garantizar un pavimento durable.
- + Adecuada estabilidad para que satisfaga las demandas de tránsito sin producir deformación o desplazamiento.
- + Un contenido de vacíos lo suficientemente alto para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas del tránsito sin que se produzca exudación o pérdida de estabilidad.
- + Trabajabilidad para permitir una colocación eficiente sin segregación.

3.1 Método Marshall.

“El concepto del método Marshall en el diseño de mezclas para pavimentación fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de Autopistas del estado de Mississippi. El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm, y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa.

Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de 64 mm de alto y 102 mm de diámetro (Figura 5); se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559).



Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; cabe mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.



Figura 5: Especímenes (Briquetas) para ensayar en prueba Marshall. [7]

La estabilidad del espécimen de prueba es la máxima resistencia en N (lb) que un espécimen estándar desarrollará a 60°C cuando es ensayado. El valor de flujo es el movimiento total o deformación, en unidades de 0.25 mm que ocurre en el espécimen entre estar sin carga y el punto máximo de carga durante la prueba de estabilidad.” [7]

3.1.1 Granulometría.

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica.

La Tabla 1 presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D3515.

3.1.2 Especificaciones del método.

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de muchos criterios. Un punto inicial para el diseño es escoger el porcentaje de asfalto para el promedio de los límites de vacíos de aire, el cual es 4%. Todas las propiedades medidas



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

y calculadas bajo este contenido de asfalto deberán ser evaluadas comparándolas con los criterios para el diseño de mezclas, indicados en la Tabla 2.

Tabla 1: Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515). [6]

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in (50 mm)	1 1/2 in (37.5 mm)	1 in (25.0 mm)	3/4 in (19.0 mm)	1/2 in (12.5 mm)	3/8 in (9.5 mm)	No. 4 (4.75 mm)	No. 8 (2.36 mm)	No. 16 (1.18 mm)
Graduaciones para mezclas de agregados gruesos, fino y filler									
2 1/2 in. (63mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
2 in. (50mm)	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 1/2 in. (37.5mm)	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
1 in. (25.0 mm)	80 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
3/4 in. (19.0mm)	...	55 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
1/2 in. (12.5mm)	35 - 65	...	55 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...
3/8 in. (9.5mm)	...	...	...	55 - 80	...	90 - 100	100	...	...
No. 4 (4.75mm)	17 - 47	25 - 53	25 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100	...	100
No. 8 (2.36mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	...	95 - 100
No. 16 (1.18mm)	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	85 - 100
No. 30 (600 µm)	...	...	...	...	...	...	35 - 65	...	70 - 95
No. 50 (300 µm)	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	45 - 75
No. 100 (150 µm)	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	20 - 40
No. 200 (75 µm)	0 - 6	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	9 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	6 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

Tabla 2: Criterio de diseño de mezclas Marshall. [6]

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		carpeta y base		carpeta y base	
Criterio de mezcla	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad, (N) (lb)	3336		5338		8006	
	750	-----	1200	-----	1800	-----
Flujo, (0.25 mm) (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.2					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Si todos los criterios se cumplen, entonces se tendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que un criterio no se cumpla, se necesitará hacer



ajustes, o rediseñar la mezcla. En la Tabla 3 se indica el mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA).

Tabla 3: Mínimo porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA). [6]

Máximo tamaño de partícula nominal		Porcentaje mínimo VMA		
		Porcentaje diseño vacíos de aire		
mm	in	3.0	4.0	5.0
1.18	No.16	21.5	22.5	23.5
2.36	No.8	19.0	20.0	21.0
4.75	No.6	16.0	17.0	18.0
9.5	3/8.	14.0	15.0	16.0
12.5	1/2.	13.0	14.0	15.0
19	3/4.	12.0	13.0	14.0
25	1.0	11.0	12.0	13.0
37.5	1.5	10.0	11.0	12.0

3.1.3 Evaluación y ajustes de una mezcla de diseño.

Cuando se desarrolla una mezcla de diseño, es frecuentemente necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño. Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares o exploratorias, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la graduación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se deberán realizar serias consideraciones.

Existen lineamientos generales para ajustar las mezclas de prueba, aunque estas sugerencias no funcionan en todos los casos:

3.1.3.1 Vacíos bajos y estabilidad baja.

Los vacíos pueden incrementarse en diferentes formas. Como un acercamiento



general para lograr vacíos altos en el agregado mineral (en consecuencia proveer de suficientes espacios, para una adecuada cantidad de asfalto y vacíos de aire), la graduación del agregado debe ajustarse mediante la adición de más agregado grueso o fino.

Si el contenido de asfalto es más alto de lo normal y el exceso no es necesario para remplazar el absorbido por el agregado, entonces el contenido de asfalto deberá reducirse a fin de incrementar el porcentaje de vacíos, proveyendo un adecuado VMA. Se deberá recordar que disminuir el porcentaje de asfalto podrá tender a bajar la durabilidad del pavimento. Demasiada reducción en el contenido de asfalto puede ocasionar fracturación, oxidación acelerada e incremento de la permeabilidad. Si los ajustes anteriores no producen una mezcla estable, el agregado tendrá que cambiarse.

Es también posible mejorar la estabilidad e incrementar el contenido de vacíos en el agregado de la mezcla, mediante el incremento del agregado grueso o reducción de la cantidad de material que pasa la malla No. 200. Con la incorporación de arena procesada, el contenido de vacíos puede mejorarse sin sacrificar la estabilidad de la mezcla.

3.1.3.2 Vacíos bajos y estabilidad satisfactoria.

Bajos contenidos de vacíos pueden eventualmente resultar en inestabilidad debido a flujo plástico o después de que el pavimento ha sido expuesto al tránsito por un periodo de tiempo ante la reorientación de las partículas y compactación adicional.

Por su parte, insuficientes vacíos pueden ser producto de la cantidad requerida de asfalto para obtener una durabilidad alta en mezclas finas; sin embargo, la estabilidad es inicialmente satisfactoria por el tránsito específico. Una degradación de agregado pobre durante la producción de la mezcla y/o bajo la acción de tránsito puede ocasionar subsecuentemente inestabilidad y flujo si el contenido de vacíos de la mezcla no es suficiente. Por estas razones, mezclas con vacíos bajos tendrán que ajustarse por uno de los métodos dados, en el inciso anterior sin importar que la estabilidad inicial sea satisfactoria.

3.1.3.3 Vacíos satisfactorios y estabilidad baja.

La baja estabilidad cuando los vacíos y la graduación del agregado son satisfactorios, puede indicar algunas deficiencias en el agregado. Se deberán tomar consideraciones para mejorar la forma de la partícula de los agregados utilizando material producto de trituración o incrementando el porcentaje de agregado grueso en la mezcla o posiblemente aumentando el tamaño máximo del agregado. Partículas de agregado con textura rugosa y superficies menos redondeadas, presentan más estabilidad cuando se mantiene o incrementa el volumen de vacíos.



3.1.3.4 Vacíos altos y estabilidad satisfactoria.

Altos contenidos de vacíos se asocian frecuentemente con mezclas con alta permeabilidad; al permitir la circulación de aire y agua a través del pavimento pueden ocasionar endurecimiento prematuro del asfalto, desprendimiento del agregado, o posible desprendimiento del asfalto en el agregado. Aun cuando la estabilidad es satisfactoria, se deberán realizar ajustes para reducir los vacíos.

Pequeñas reducciones se lograrán mediante la adición de polvo mineral a la mezcla. Podría ser necesario seleccionar o combinar agregados para lograr una graduación, la cual deberá estar cerca de la curva de máxima densidad.

3.1.3.5 Vacíos altos y estabilidad baja.

Se deberán tomar en cuenta dos pasos para este tipo de condiciones; el primero es ajustar el volumen de vacíos mediante los métodos discutidos en los puntos anteriores; y en el segundo, si los ajustes no mejoran la estabilidad, deberá hacer una consideración de la calidad de los materiales, conforme en 3.1.3.1 y 3.1.3.2.

3.1.4 Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas.

En el método Marshall se llevan a cabo tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

3.1.4.1 Determinación de la gravedad específica.

La prueba de gravedad específica puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se desarrolla de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas empleando parafina; o ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando superficies saturadas de especímenes secos.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se utiliza la Norma ASTM D1188, en caso contrario, se recurre a la Norma ASTM D2726.

3.1.4.2 Prueba de estabilidad y fluencia.

Después de que la gravedad específica se ha determinado, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ($140^{\circ}\text{F} \pm 1.8^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba.

Con el equipo de prueba listo (Figura 6), se removerá el espécimen de prueba

del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocar la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga.



Figura 6: Prensa de carga. [6]

Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51mm por minuto, hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de N (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que la prueba de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0.25 mm será el valor del flujo Marshall.

3.1.4.3 Análisis de densidad y vacíos.

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (VA); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado



mineral (VMA).

A continuación se puede observar de una forma sintetizada, los pasos necesarios que son solicitados por el Método Marshall:

- + Selección de las muestras de material: secar el agregado:
 - Hacer un análisis granulométrico por vía húmeda.
 - Determinar el peso específico del material.
- + Selección del tipo de mezcla: el asfalto debe estar clasificado previamente por viscosidad o por penetración.
- + Evaluación de la granulometría de los agregados: (el tamaño máx. del agregado debe ser de 1 pulgada.)
- + Proporción de agregados y asfaltos.
- + Preparación de especímenes de ensayo:
 - Determinación del peso específico total.
 - Medición de la estabilidad y la fluencia (2 gráficas).
 - Análisis de la densidad y del contenido de vacíos.
 - Análisis de vacíos.
 - Análisis del peso unitario.
 - Análisis de vacíos en el agregado mineral (VMA).
 - Análisis de vacíos llenos de asfalto (VFA).
- + Determinación de la gravedad específica de los especímenes compactados.
- + Ensayo estabilidad – flujo.
- + Determinación de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta.
- + Análisis densidad – vacíos.

3.2 Método SUPERPAVE.

Con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación (fondos provenientes de Estados Unidos, Canadá, México y algunos países de Europa), se desarrolló entre octubre de 1987 y marzo de 1993 el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras, más conocido por sus siglas en inglés SHRP (Strategic Highway Research Program), a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras, volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement). Representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento.

Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados.



El sistema SUPERPAVE entrega:

- ✚ Nuevas especificaciones para asfaltos.
- ✚ Nuevas especificaciones para agregados.
- ✚ Nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas.
- ✚ Nuevos modelos de predicción del comportamiento.

Enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente, el primer paso del análisis SUPERPAVE involucra la selección cuidadosa de los materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos. Los niveles superiores de análisis requieren la utilización de sofisticados ensayos, gran parte de los cuales aún se encuentran siendo perfeccionados. Estos niveles apuntan a determinar con precisión el comportamiento futuro de la estructura del pavimento ante variables como el clima y el tráfico.

3.2.1 Especificaciones del método.[8]

El método SUPERPAVE está compuesto por tres niveles. Debido a que el análisis y el diseño de una mezcla en el sistema SUPERPAVE son complejos, la extensión del uso de esta metodología (según los investigadores del SHRP) depende del nivel de tránsito y de la función de la mezcla en el pavimento. La Tabla 4 especifica los distintos niveles considerados para el análisis y diseño de las mezclas asfálticas en caliente mediante la metodología SUPERPAVE.

Tabla 4: Niveles de Análisis Método SUPERPAVE. [8]

Tránsito (ESAL)	Nivel de Diseño	Requerimientos de Ensayo
$ESAL < 10^6$	Primer Nivel de Análisis	Diseño volumétrico
$10^6 < ESAL < 10^7$	Análisis Intermedio	Diseño volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento
$10^7 < ESAL$	Análisis Completo	Diseño volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento adicionales

ESAL: Ejes Equivalentes (Equivalent Single Axle Load).

3.2.1.1 Primer Nivel.

Este nivel requiere el diseño volumétrico, el cual involucra los siguientes aspectos:

- ✚ Selección del tipo de asfalto.
- ✚ Selección de las propiedades de los agregados.
- ✚ Preparación de especímenes de ensayo.
- ✚ Selección del contenido de asfalto.

Esta actividad se basa en la estimación de las propiedades volumétricas de la mezcla: contenido de vacíos de la mezcla (VA), vacíos en el agregado mineral



(VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

3.2.1.2 Nivel Intermedio.

Este nivel utiliza como punto inicial el análisis volumétrico del nivel anterior. Los ensayos establecidos para el nivel intermedio de análisis son:

- ✚ Ensayo de corte (SST, SUPERPAVE shear test).
- ✚ Ensayo de tensión indirecta (IDT, indirect tensile test).

Utilizando equipos IDT y SST, son realizados varios ensayos para lograr de esta manera una serie de predicciones del comportamiento de la mezcla.

3.2.1.3 Nivel Avanzado (Completo).

Incluye la totalidad de los pasos realizados en los niveles anteriores, pero se realizan pruebas adicionales IDT y SST, a una amplia gama de temperaturas. Un completo análisis de la mezcla utiliza especímenes confinados SST y ofrece un mayor y más confiable nivel de predicción del comportamiento de la misma. Utilizando la metodología SUPERPAVE, los resultados de los ensayos de comportamiento de las mezclas asfálticas permiten estimar con gran precisión el comportamiento del pavimento durante el transcurso de su vida útil, en términos de ejes equivalentes (ESALs).

De la misma manera, permite estimar la cantidad de ejes equivalentes para alcanzar cierto nivel de resistencia al desplazamiento, a grietas por fatiga o a grietas por bajas temperaturas.

3.2.2 Algoritmo de Diseño.

El algoritmo de diseño para mezclas SUPERPAVE es el presentado en la Figura 7 adjunta. El diseño, como se aprecia en la figura, se enfoca inicialmente en la selección del ligante asfáltico y del agregado.

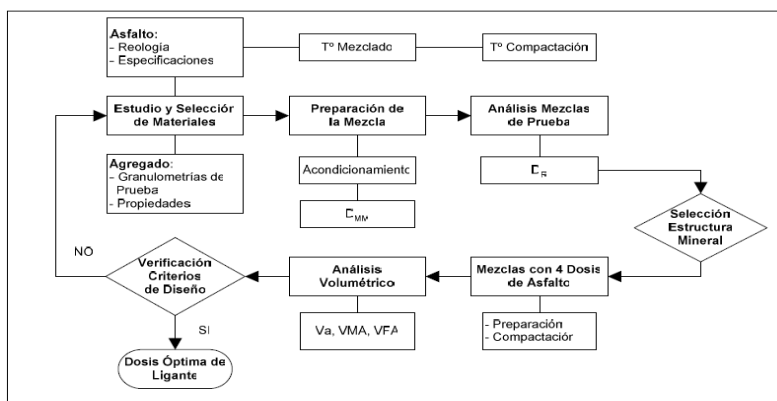


Figura 7: Algoritmo de diseño SUPERPAVE. [8]



3.2.3 Estudio y Selección de los Materiales.

3.2.3.1 Asfaltos.

Las especificaciones SUPERPAVE se enfocan en simular por medio de ensayos de laboratorio los 3 estados críticos a los cuales se ve expuesto el asfalto durante su vida útil:

- + **Primer estado.-** asfalto original, estado que se da durante el transporte, almacenamiento y manejo del ligante asfáltico.
- + **Segundo estado.-** envejecimiento producido luego de la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica.
- + **Tercer estado.-** envejecimiento de la mezcla asfáltica cuando ha permanecido en servicio por un largo período.

Para simular el segundo estado, el endurecimiento producto de la oxidación que ocurre durante el mezclado y colocación de la mezcla, se utiliza el horno rotatorio de película delgada RTFOT (rolling thin film oven test).

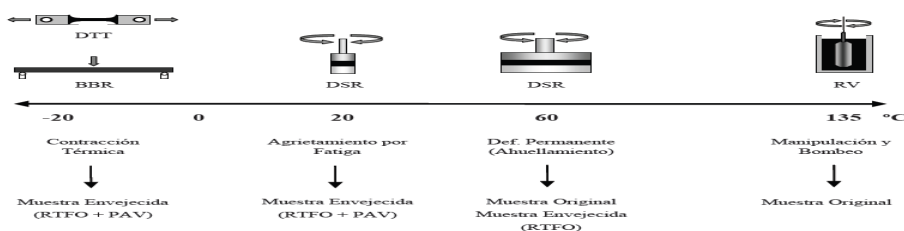
Posteriormente, mediante el ensayo PAV (pressure aging vessel) se oxida aceleradamente la mezcla, simulando el tercer estado (envejecimiento severo que sufre la mezcla después de haber estado en servicio por muchos años).

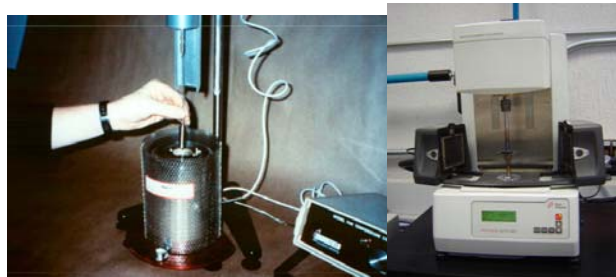
Las propiedades físicas de los asfaltos en el sistema SUPERPAVE son medidas sobre los asfaltos envejecidos en el laboratorio, simulando así las condiciones reales de operación del pavimento.

La medición de las propiedades físicas se realiza mediante la utilización de 4 equipos de ensayo, cuyo propósito se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5: Equipos para determinar Propiedades Físicas del Asfalto. [8]

Equipo	Propósito
DSR (Dynamic Shear Rheometer)	Mide las propiedades del asfalto a T° alta e intermedia.
RV (Rotacional Viscometer)	Mide las propiedades del asfalto a alta T°.
BBR (Bending Beam Rheometer)	Mide las propiedades del asfalto a baja T°.
DTT (Direct Tension Tester)	Mide las propiedades del asfalto a baja T°.





Viscosímetro rotacional (RV). Reómetro de corte dinámico (DSR). [7]



Reómetro de flexión en vigas (BBR). [9] Equipo de tensión directa (DT). [9]

3.2.3.2 Selección del Grado Asfáltico.

Una parte importante del primer nivel de diseño SUPERPAVE son las nuevas especificaciones para la selección de los ligantes asfálticos, definidas por su grado de comportamiento PG (Performance Grade).

La nueva nomenclatura que define el grado de comportamiento de los asfaltos es **PG XX-YY**, donde:

- + PG.- Performance Grade.
- + XX.- Temperatura Máxima (temperatura máxima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante el servicio).
- + YY.- Temperatura Mínima (temperatura mínima a la cual el asfalto debe mantener sus propiedades durante el servicio).

Los asfaltos definidos en el método SUPERPAVE se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Rangos para el grado PG. [8]

	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
PG	46	34, 46, 52
PG	52	10, 16, 22, 28, 34, 40, 46
PG	58	16, 22, 28, 34, 40
PG	64	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG	70	10, 16, 22, 28, 34, 40
PG	76	10, 16, 22, 28, 34
PG	82	10, 16, 22, 28, 34



Deben ser utilizadas bases de datos de estaciones climáticas, con registros de temperatura ambiente por más de 20 años (como mínimo). Para cada año deben ser determinados:

- + El promedio de las temperaturas máximas de los 7 días consecutivos más calurosos del año (temperatura del aire).
- + La temperatura mínima del día más frío del año (temperatura del aire).

Para ambas series de datos (los cuales son considerados como XX_{aire} e YY_{aire}) deben ser determinados su promedio y la desviación estándar.

Temperaturas del Aire (TX_{aire} y TY_{aire}).- La temperatura máxima y mínima del aire que debe ser considerada en el diseño, dependerá de la confiabilidad requerida (z) y de la desviación estándar de los datos (σ). Es decir:

- + $TX_{aire} = T_{Promedio} + z * \sigma$
- + $TY_{aire} = T_{Promedio} - z * \sigma$

Una confiabilidad de 50% considera un verano e invierno promedios. Por el contrario, confiabilidades mayores asumen veranos más calurosos e inviernos más fríos.

Temperaturas del Pavimento (TX y TY).- Se calculan a partir de las temperaturas del aire y de un coeficiente (Lat) dado por la ubicación geográfica de la zona a pavimentar (latitud).

- + $TX = (TX_{aire} - 0.00618 * Lat^2 + 0.2289 * Lat + 42.2) * (0.9545) - 17.78$
- + $TY = TY_{aire}$ (En Canadá: $TY = 0.859 * TY_{aire} + 1.7$)

Efecto del Tránsito: Velocidad de Carga y Tránsito Acumulado.- El ensayo DSR simula la carga de un vehículo a 90 kilómetros por hora. A velocidades menores, producto que el tiempo de carga es mayor, la rigidez de la mezcla disminuye. Por ello, se recomienda aumentar (en función de la velocidad de carga) en 1 ó 2 niveles el grado XX requerido, debido a que aumentar el tiempo de carga sobre un pavimento es equivalente a aumentar la temperatura del mismo.

Por ejemplo, si se requiere para una carga normal el grado PG 64-22, es recomendable utilizar el grado PG 70-22 si las cargas serán lentas y el grado PG 76-22 si las cargas serán estacionarias.

Un mayor número de ejes equivalente totales significa que se producirán más ciclos de carga, por lo que las deformaciones permanentes acumuladas serán mayores. Por lo tanto, para evitar el ahuellamiento, debe ser seleccionado un asfalto más rígido a alta temperatura (elevar 1 nivel el grado XX).



3.2.3.3 Agregados.[6]

El programa SHRP no desarrolló nuevos ensayos para los agregados, sin embargo, fueron adoptados ensayos adicionales y las especificaciones fueron reformuladas, con el objetivo de ajustarlas dentro del sistema SUPERPAVE. Es así como fueron definidas dos tipos de propiedades de los agregados: las propiedades de consenso y las de origen.

Propiedades de Consenso. Son consideradas críticas para alcanzar un alto comportamiento de la mezcla. Se asocian a la calidad del agregado para producir una mezcla resistente y durable.

Las propiedades de consenso (características de los agregados que pueden ser alteradas en las plantas de chancado y selección) son:

- + Angularidad del agregado grueso.
- + Angularidad del agregado fino.
- + Partículas planas y alargadas.
- + Contenido de arcilla (equivalente de arena).
- + Granulometría combinada.

Estas propiedades deben reunir distintos niveles de calidad, los cuales dependen del nivel de tráfico (ejes equivalentes) y de la posición de la mezcla dentro de la estructura del pavimento.

Con la angularidad del agregado se busca alcanzar mezclas con alto grado de fricción interna, y por ende, una alta resistencia a los esfuerzos de corte. Ello permite mejorar la resistencia a la deformación permanente de la mezcla.

La limitación del porcentaje de partículas alargadas asegura la no susceptibilidad del agregado a triturarse durante el manejo de la mezcla y su posterior construcción y funcionamiento.

Por otra parte, la limitación de la cantidad de arcilla en los agregados mejora la adherencia de los áridos con el asfalto.

Propiedades de Origen.- Son aquellas propiedades asociadas a la calidad de la fuente del agregado. Si bien SHRP no especifica valores críticos, estas propiedades deben ser especificadas de acuerdo a la experiencia local. Las propiedades de origen, las cuales dependen del lugar de obtención de los áridos, son:

- + Tenacidad o dureza.
- + Durabilidad.
- + Materiales deletéreos.

Graduación de los Agregados.- Para especificar la granulometría, Superpave



ha modificado el enfoque de la granulometría Marshall. Emplea el exponente 0.45 en la carta de granulometría para definir la permitida (gráfica de Fuller), mediante una técnica gráfica única para juzgar la distribución de tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados.

Las ordenadas de la carta son los porcentajes que pasan; las abscisas, en escala aritmética, representan las aberturas de los tamices en mm, elevadas a la potencia 0.45. La Figura 8 ilustra cómo se calcula el valor de la abscisa. En el ejemplo la malla de 4.75mm se grafica como 2.02.

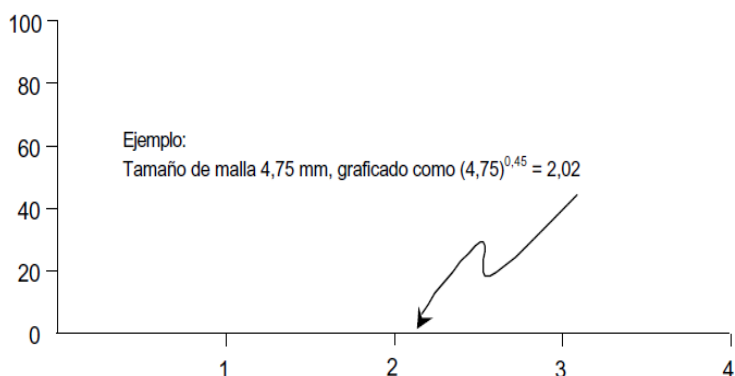


Figura 8: Ilustración de cómo se grafican las abscisas. [6]

Normalmente este tipo de gráficas no muestran una escala aritmética común, en vez de ello, la escala está en función de tamaño de malla como se observa en la Figura 9.

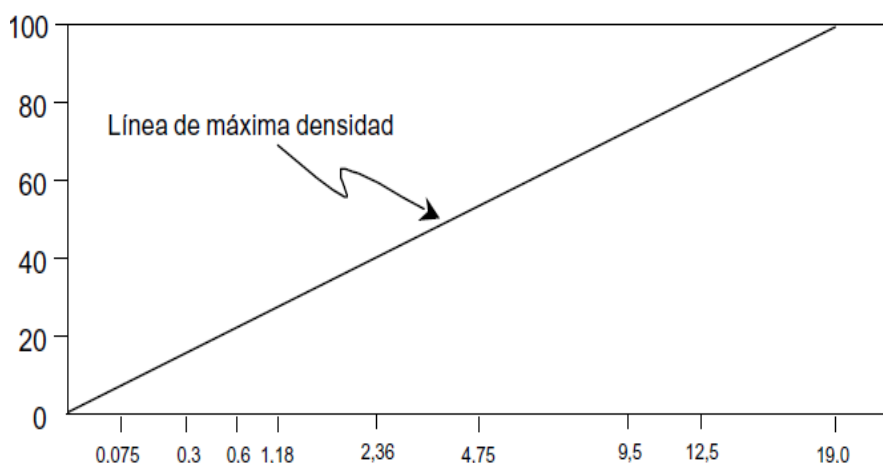


Figura 9: Graduación de máxima densidad para tamaño máximo de 19 mm. [6]

Un rango importante de esta carta es la granulometría de máxima densidad; corresponde a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo de agregado y ordenada 100%, hasta el origen (0 %, 0 mm).



La granulometría de máxima densidad representa la graduación para la cual las partículas de agregado se acomodan entre sí, conformando el arreglo volumétrico más compacto posible.

Evidentemente, esta granulometría debe evitarse porque habría muy poco espacio entre los agregados como para permitir el desarrollo de una película de asfalto lo suficientemente gruesa, como para obtener una mezcla durable.

Para especificar la granulometría del agregado, se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y una zona restringida. Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm) y un tamaño de finos (0.075 mm).

Por su parte, la zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 o 2.36 mm) y 0.3 mm. Forma una banda por la cual la curva granulométrica no deberá pasar. Granulometrías que pasan a través de la zona de restricción (desde abajo), se llaman "humped graduations" (graduaciones con joroba) por la forma característica de joroba que se forma en la curva al pasar por aquella zona.

En la mayoría de los casos, estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación con el total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida poseen un esqueleto granular débil que depende demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte.

La Figura 10 muestra un esquema para un tamaño máximo de agregado de 19 mm.

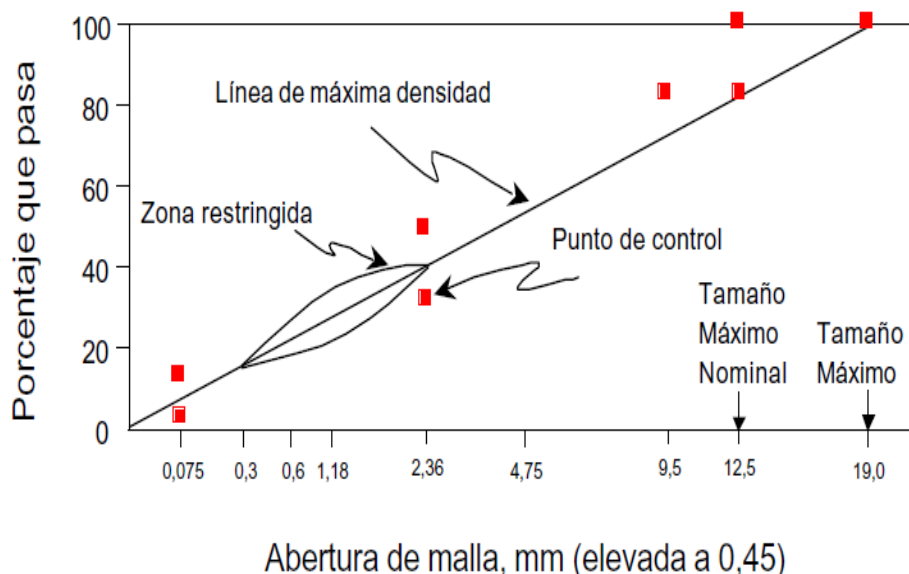


Figura 10: Límites para las granulometrías Superpave (Gráfica de Fuller). [6]



Un diseño de la estructura del agregado que pase entre los puntos de control y evite la zona de restricción, satisface los requerimientos granulométricos de Superpave.

Los valores de los parámetros.- Puntos de control y zona restringida (Tabla 7), están referenciados a cinco designaciones que la metodología Superpave establece, en las cuales proponen los tamaños máximos nominales más utilizados y los criterios correspondientes a los parámetros mencionados.

Tabla 7: Puntos de control y zonas restrictivas. [10]

Tamiz		Puntos de control (porcentaje que pasa)				
		Tamaño máximo nominal (ASTM)				
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"
ASTM	[mm]					
2"	50					100
1 1/2"	40				100	90-100
1"	25			100	90-100	
3/4"	20		100	90-100		
1/2"	12,5	100	90-100			
3/8"	10	90-100				
N° 8	2,5	32-67	28-58	23-49	19-45	15-41
N° 200	0,08	2,0-10,0	2,0-10,0	2,0-8,0	1,0-7,0	0,0-6,0
Tamiz		Zona restrictiva (porcentaje que pasa)				
ASTM	[mm]					
N° 4	5				39,5	34,7
N° 8	2,5	47,3	39,1	34,6	26,8-30,8	23,3-27,3
N° 16	1,25	31,9-37,6	25,6-31,6	22,3-28,3	18,1-24,1	15,5-21,5
N° 30	0,63	23,5-27,7	19,1-23,1	16,7-20,7	13,6-17,6	11,7-15,7
N° 50	0,315	18,4	15,5	13,7	11,4	10

En la Tabla 8 se presentan las cinco designaciones propuestas en la metodología SUPERPAVE.

Tabla 8: Graduaciones para mezcla Superpave. [6]

Designación Superpave	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Las Tablas 9 y 10 contienen las especificaciones de puntos de control y zona restringida para los dos tamaños máximos nominales de agregados más usuales.



Tabla 9: Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19 mm. [6]

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25,0		100,0		
19,0	90,0	100,0		
12,5		90,0		
2,36	23,0	49,0	34,6	34,6
1,18			22,3	28,3
0,600			16,7	20,7
0,300			13,7	13,7
0,075	2,0	8,0		

Tabla 10: Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm. [6]

Malla (mm)	Puntos de control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19,0		100,0		
12,5	90,0	100,0		
9,5		90,0		
4,75				
2,36	28,0	58,0	39,1	39,1
1,18			25,6	31,6
0,600			19,1	23,1
0,300			15,5	15,5
0,075	2,0	10,0		

3.2.3.4 Mezclas Asfálticas.

Dos características claves del método de diseño SUPERPAVE son:

- ✚ El acondicionamiento de la mezcla.
- ✚ La compactación efectuada en laboratorio.

Las mezclas asfálticas que son utilizadas para fabricar briquetas, son acondicionadas durante 2 horas dentro de un horno a la temperatura de compactación (las temperaturas de mezclado y compactación se determinan igual que en el método de diseño tradicional, en función de la viscosidad del asfalto).

Ello permite simular el envejecimiento de “corto plazo” que se produce durante el almacenamiento y transporte de la mezcla asfáltica, dando tiempo además al agregado para absorber el asfalto.

La compactación en laboratorio es realizada haciendo uso del Compactador Giratorio o SGC (SUPERPAVE Gyratory Compactor, Figura 11). Este equipo efectúa una rotación con un ángulo de inclinación de 1.25 grados y aplica sobre

la mezcla una presión de confinamiento de 600 KPa.

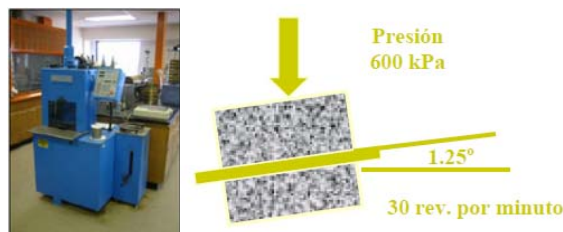


Figura 11: Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC). [10]

La suma de ambos factores simula el efecto producido por los rodillos compactadores (el número de rotaciones requeridas, NDIS, se especifica en AASHTO TP4-93). El SGC incorpora un software que indica la altura del espécimen y el número de revoluciones, lo que permite determinar el grado de compactación de la briqueta a lo largo de todo el proceso de compactación (ingresando previamente el peso inicial y la densidad máxima de la mezcla).

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de dos factores, que son los criterios establecidos para la compactación y el número de giros aplicados. Para el caso del compactador giratorio se puede mencionar como parámetros establecidos el esfuerzo vertical, ángulo de giro y velocidad de giro. En la Tabla 11 se observan los valores de los parámetros mencionados.

Tabla 11: Valores de los parámetros. [6]

Esfuerzo vertical	600 kPa
Ángulo de giro	1.25 °
Velocidad de giro	30 rpm

La selección del número de giros está en función de la temperatura promedio del lugar y del número de ejes equivalentes (ESALs) establecidos en el diseño. En la Tabla 12 se muestran los diferentes rangos de valores establecidos para seleccionar el número de giros.

Tabla 12: Esfuerzo de compactación giratoria para el diseño SUPERPAVE. [6]

ESAL's de diseño (millones)	Temperatura promedio del aire para diseño											
	< 39°C			39 – 40 °C			41 – 42 °C			43 – 44 °C		
	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}	N _{ini}	N _{des}	N _{máx}
<0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3 - 1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1 - 3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3 - 10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10 - 30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30 - 100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
>100	9	143	235	10	158	262	10	165	275	10	172	288



Pruebas a las mezclas asfálticas.- Los requerimientos del diseño de mezclas asfálticas de SUPERPAVE son:

✚ **Requerimientos volumétricos de la mezcla.-** Los requerimientos correspondientes son: vacíos de aire; vacíos del agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. El contenido de vacíos de aire es una propiedad importante que se utiliza como base en la selección del contenido del ligante asfáltico. Superpave define los vacíos del agregado mineral (VAM), como la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo, en una muestra compactada. Representa los vacíos entre las partículas del agregado. Los valores mínimos especificados para el VAM en cuanto al porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4% son una función del tamaño máximo nominal del agregado. La Tabla 13 muestra los requerimientos del Superpave para el VAM. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje de VAM que contiene ligante asfáltico. Consecuentemente, VFA es el volumen de ligante asfáltico efectivo expresado como el porcentaje de VAM.

Tabla 13: Criterio para VAM. [6]

Tamaño máximo de agregado	Porcentaje de VAM mínimo
9,5 mm	15,0
12,5 mm	14,0
19,0 mm	13,0
25,0 mm	12,0
37.5 mm	11,0

El rango aceptable del VFA de diseño para 4% de vacíos de aire es una función del nivel de tránsito (Tabla 14).

Tabla 14: Criterio para VFA. [6]

Tránsito, ESAL's (millones)	Porcentaje de VAM de diseño
< 0,3	70 – 80
< 1	65 – 78
< 3	65 – 78
< 10	65 – 75
< 30	65 – 75
< 100	65 – 75
>100	65 – 75

✚ **Proporción de polvo.-** Otro requerimiento de la mezcla es la proporción de polvo; se calcula como la relación entre el porcentaje en peso del agregado más fino que el tamiz 0.075 mm y el contenido de asfalto efectivo en porcentaje del peso total en la mezcla, menos el porcentaje de asfalto absorbido.



✚ **Susceptibilidad a la humedad.-** El ensayo de susceptibilidad a la humedad para evaluar una Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA: Hot Mix Asphalt) al desprendimiento es la Norma T 283, "Resistencia de mezclas bituminosas compactadas al daño inducido por humedad". Este ensayo, que no se basa en el desempeño, sirve para dos propósitos; primero, identificar si una combinación de cemento asfáltico y agregado es susceptible a la acción del agua; segundo, mide la efectividad de los aditivos anti desprendimiento o de mejora de adherencia.

3.2.3.5 Etapa de Prueba.

Se deben preparar distintas mezclas de prueba (utilizando diferentes mezclas de agregados) a las cuales, luego de efectuada la compactación, se les determinan los parámetros volumétricos (porcentaje de asfalto Pb, porcentaje de vacíos Va, vacíos del agregado mineral VMA y vacíos llenos con asfalto VFA).

La premisa central del diseño volumétrico SUPERPAVE es que las muestras de prueba deben contener la cantidad adecuada de cemento asfáltico, tal que se alcance exactamente un 96% de compactación respecto a la DMM (es decir, 4% de vacíos para NDIS).

Es por ello que se estiman nuevos parámetros volumétricos, utilizando los inicialmente calculados, para el caso en que el contenido de vacíos (VA) fuera 4%. Las fórmulas para realizar las estimaciones son las siguientes:

- ✚ $Pb_{ESTIMADO} = Pb_{INICIAL} - 0.4 \cdot (4 - Va_{INICIAL})$
- ✚ $\%VMA_{ESTIMADO} = \%VMA_{INICIAL} + C \cdot (4 - Va_{INICIAL})$
- ✚ $\%VFA_{ESTIMADO} = 100 \cdot [(\%VMA_{ESTIMADO} - 4) / (\%VMA_{ESTIMADO})]$
- ✚ $C = 0.1$ si $Va_{INICIAL} < 4\%$
- ✚ $C = 0.2$ si $Va_{INICIAL} > 4\%$

Dichas estimaciones permitirán efectuar una apropiada y objetiva comparación entre las distintas mezclas de prueba utilizadas. El diseñador deberá elegir la "estructura de agregados de diseño", es decir, aquella mezcla de prueba que de mejor forma cumpla con los requisitos señalados en la especificación AASHTO MP2-95.

3.2.3.6 Diseño Definitivo.

Seleccionada la estructura de agregados de diseño, deben ser preparados los siguientes especímenes:

- ✚ 2 con $Pb_{ESTIMADO}$.
- ✚ 2 con $Pb_{ESTIMADO} + 0.5\%$
- ✚ 2 con $Pb_{ESTIMADO} - 0.5\%$
- ✚ 2 con $Pb_{ESTIMADO} + 1.0\%$
- ✚ 2 especímenes sueltos con $Pb_{ESTIMADO}$ (para determinar densidad



máxima).

Los especímenes son preparados y ensayados de la misma manera que en el caso de la selección de la estructura de agregados. Con los resultados de las propiedades de la mezcla en función del contenido de asfalto (confeccionados los gráficos) se procede de la siguiente manera:

- + Determinar Pb con el cual se obtiene 4% de vacíos de aire (VA).
- + Determinar las propiedades de la mezcla al contenido de asfalto seleccionado.
- + Comparar las propiedades de la mezcla con los criterios de diseño SUPERPAVE (AASHTO MP2-95).
- + Evaluada la sensibilidad de la mezcla a la humedad, analizando la pérdida de adherencia entre el asfalto y el agregado por medio del ensayo ASSHTO T283.

Con el paso anterior se concluye el diseño SUPERPAVE del nivel 1. Como se mencionó anteriormente los niveles 2 y 3, se encuentran aún en etapas de prueba y perfeccionamiento.

3.3 Método Hveem. [11]

Desarrollado en el Departamento de Carreteras de California un método de diseño de espesores de pavimentos flexibles que se fundamenta en un conjunto de pruebas de laboratorio. El método de diseño es de requerimiento múltiple, en el sentido que se exige que el pavimento finalmente aceptado cumpla condiciones en relación a la presión de expansión, presión de exudación, valor de estabilidad, obtenido en el estabilómetro y a la resistencia a la tensión por flexión, medida en las capas superiores del pavimento, por medio del cohesiómetro.

El espesor del pavimento que neutraliza la presión de expansión de la subrasante obtenida en el laboratorio “Pe” será:

$$e_t = \frac{P_e}{Y_m}$$

donde:

- + e_t = espeso requerido para neutralizar la presión de expansión en la subrasante por el peso de las carpetas superiores del pavimento, en cm.
- + P_e = presión de expansión, determinada en la prueba de laboratorio, en kg/cm^2 .
- + Y_m = peso volumétrico medido de la estructura del pavimento, en kg/cm^2 .

En virtud de que la presión de expansión en la subrasante depende del contenido de agua de esta y como varíe con el tiempo de dicho contenido de



agua es a su vez función de la humedad de compactación, se prevé la formación de tres especímenes, por lo menos fabricados con tres humedades diferentes, de manera que a fin de cuentas se tienen espesores, ligados a tres presiones de expansión, una para cada espécimen.

En lo se refiere al valor de estabilidad obtenida en el estabilómetro de Hveem, el espesor de pavimento correspondiente resulta de la fórmula:

$$eg = 0.098(IT)(100-R)$$

donde:

- + eg = Espesor del pavimento necesario de acuerdo con la resistencia del suelo según la prueba del estabilómetro, cm.
- + IT = índice de tránsito, referido a cargas equivalentes a 5000 lb por rueda para un periodo de 10 años.
- + R = es el número de estabilidad de Hveem, calculado en laboratorio en estabilómetro de Hveem.

Para asegurar que no se transmitan al suelo presiones que le hagan generar presiones de poro inconvenientes, no debe utilizarse un valor de R mayor que el que corresponde a una presión de exudación de 21 kg/cm² (300lb/plg²), también se pueden considerar la Figura 12 para determinar estas condiciones.

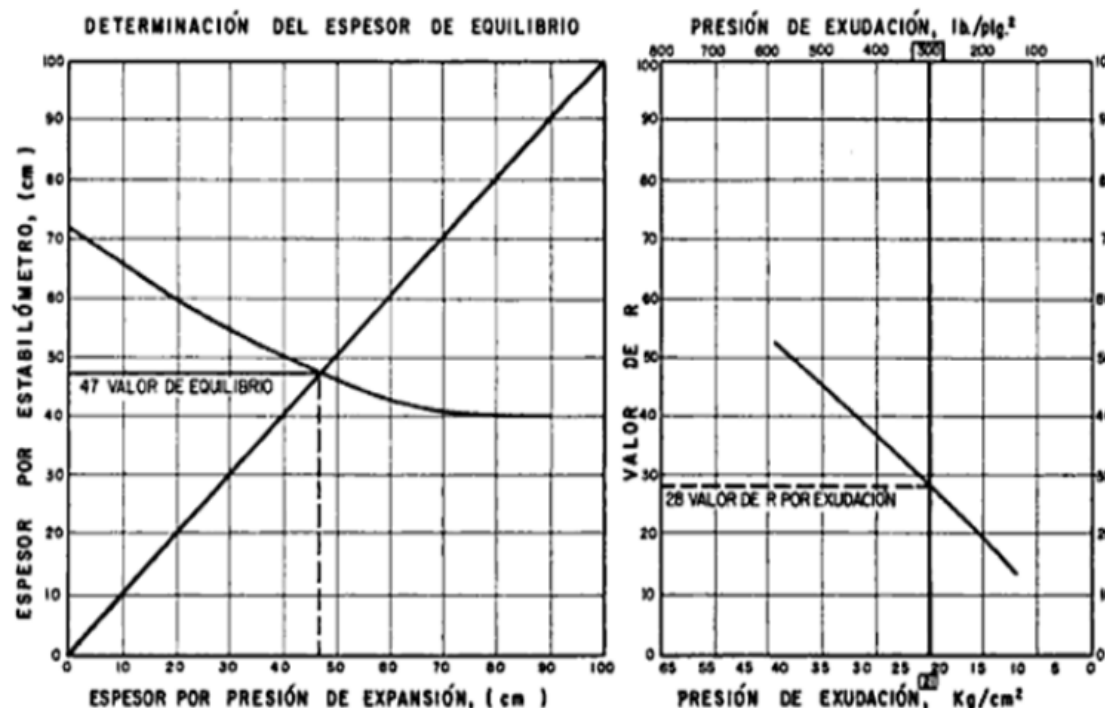


Figura 12: Determinación del espesor de equilibrio. [11]



3.3.1 Procedimientos de diseño.

Para diseñar el espesor del pavimento se procede:

1. Elaborar 3 probetas con contenidos de agua diferente, a fin de que 2 de ellas tengan una presión de exudación por debajo de 21 kg/cm^2 (300 lb/plg^2) en tanto que la tercera la tenga mayor o que uno la tenga mayor y los otros 2 menores. La presión de exudación de las 3 probetas deberán estar comprendidas entre 7 y 56 kg/cm^2 (100 y 800 lb/plg^2).
2. Determinar los valores de presión de exudación de cada de las 3 probetas para después saturarse con absorción de agua libre al ser sometidas a la prueba de presión de expansión.
3. Las mismas probetas deberán colocarse en el estabilómetro de Hveem para obtener el valor de R.
4. Como consecuencia para cada humedad de moldeo se tiene una probeta de la que se conoce la presión de exudación la presión de expansión y el valor de estabilidad.
5. Aplicando la primera fórmula (et) se calcula el espesor del pavimento por expansión para las condiciones representadas por cada una de las probetas.
6. Aplicando la segunda fórmula (eg) será posible conocer el espesor de cubrimiento necesario en cada caso atendiendo la condición de estabilidad. La Figura 13 nos ayuda a establecer este valor.

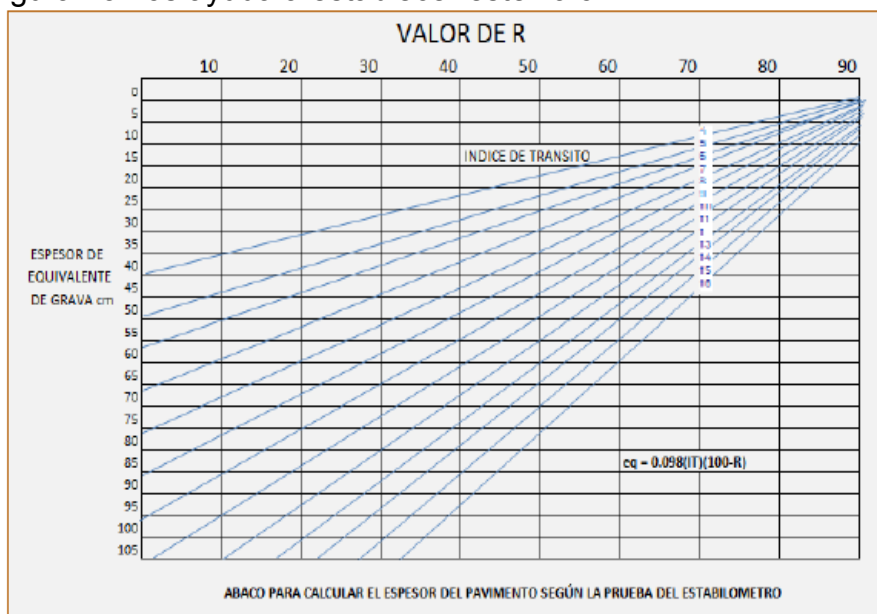


Figura 13: Valor de R. [11]

7. Se dibuja un gráfico en que se puede comparar los espesores de cubrimientos requeridos por expansión y por estabilidad donde la intersección de esta gráfica con una recta de 45 grados marca el espesor que satisface a la vez ambas condiciones.
8. Se dibuja un gráfico en lo que se anota los valores de R contra las

correspondientes presiones de exudación. Como la presión de máxima permisible es de 21kg/cm^2 , se tiene un valor de R límite por ese concepto. Con tal valor de R y la figura 3.8, conocido el índice de transito se tendrá otro espesor necesario de recubrimiento, atendiendo la presión de exudación.

9. Comparar la expresión de equilibrio obtenido en el paso 7, con el espesor por presión de exudación obtenido en el paso 8. El mayor será el espesor de recubrimiento que requiere el material que se está estudiando.
10. Se comienza aplicándose al terreno de fundación manejando probetas que permitirá obtener el espesor con que tal material a de cubrirse para tener un comportamiento satisfactorio. Hveem llamo a ese material de cubrimiento graba equivalente un material con las características de una base común.
11. El método se repetirá para la subrasante fabricando probetas con el material podrá encontrarse el espesor de grava equivalente necesario para protegerlo. De esta manera se procede en dirección accedente hasta completar la estructura deseada del pavimento.

3.3.2 Procedimiento del ensayo.

Existen 3 procedimientos los cuales son:

- ✚ Ensayo de estabilómetro.
- ✚ Ensayo de cohesiómetro.
- ✚ Ensayo de expansión.

3.3.2.1 Ensayo de estabilómetro.

Este ensayo está diseñado para medir la estabilidad de una mezcla de prueba bajo esfuerzos específicos. La probeta compactada es colocada dentro del estabilómetro (Figura 14), en donde está rodeada por una membrana de caucho. Una carga vertical es impuesta sobre la probeta y la presión lateral (horizontal) resultante es medida.

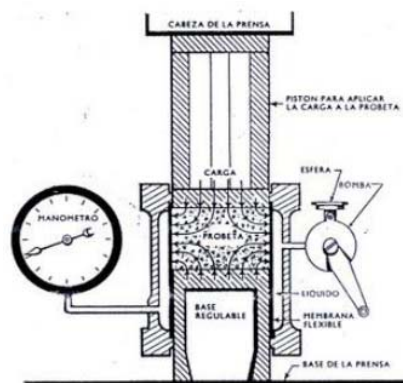


Figura 14: Estabilómetro. [11]



Los resultados del estabilómetro dependen, en gran parte, de la fricción interna (resistencia) de los agregados, y es un menos grado, de la consistencia del asfalto.

Dicho ensayo se efectúa de la siguiente manera:

1. La probeta es calentada a 60°C.
2. La probeta es colocada en el estabilómetro.
3. La presión en el estabilómetro es elevada a 34KPa.
4. Una carga vertical es aplicada a una velocidad de 0.02 mm/s hasta lograr una carga de 26.7KN.
5. Las lecturas de presión lateral son medidas y registradas bajo cargas verticales específicas.
6. La carga vertical es disminuida a 4.45KN y se mide el desplazamiento usando una bomba de desplazamiento.
7. El valor HVEEM de estabilidad para la probeta se calcula usando la información obtenida del ensayo de estabilómetro. El valor resultante del estabilómetro está basado en la idea de que una mezcla asfáltica tiene propiedades que oscilan entre un líquido y un sólido rígido. El valor de estabilidad se obtiene de una escala arbitraria que va de 0 a 100: el 0 corresponde a un líquido que no presenta resistencia interna a cargas lentamente aplicadas, el 100 corresponde a un sólido hipotético que transmite, bajo cierta carga vertical, una presión lateral que no puede registrarse.

$$R = 100 - \frac{100}{\frac{2B}{D} \left(\frac{P_v}{P_h} \right) + 1}$$

donde:

- + R = número de estabilidad de Hveem, sin dimensiones.
- + P_v = presión vertical aplicada. El valor de R se mide generalmente para 11.2 kg/cm².
- + P_h = presión horizontal en las paredes del espécimen medida en el manómetro.
- + D = desplazamiento horizontal del espécimen, correspondiente a una presión horizontal de 7 kg/cm².

3.3.2.2 Ensayo de cohesiómetro.

La prueba del cohesiómetro proporciona una medida de la resistencia a la tensión de una mezcla asfáltica compactada, un suelo cementado o cualquier mezcla de agregados, generalmente en el caso de materiales con poca cementación no se efectúa la prueba, sino que se asignan valores de cohesiómetro atendiendo la experiencia que exista al respecto.

Equipo de prueba (Figura 15) consta de:

- + Cohesiómetro con equipo completo.
- + Termómetro.
- + Balanza de 10 kg de capacidad y un gramo de aproximación.

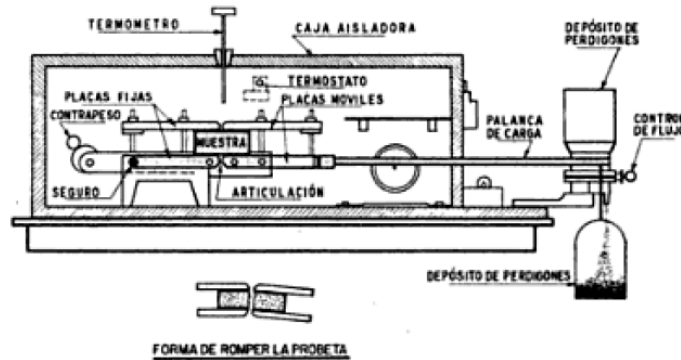


Figura 15: Equipo de prueba de cohesión. [11]

3.3.2.3 Ensayo de expansión.

El agua es el enemigo de todas las estructuras de pavimento. En consecuencia un diseño de mezcla de pavimentación debe estar rígido a proporcionarle al pavimento una adecuada resistencia al agua para garantizar su durabilidad. El ensayo de expansión mide la cantidad de agua que se filtra dentro o a través de una probeta, y la cantidad de expansión que el agua causa (Figura 16). También mide la permeabilidad de la mezcla su capacidad de permitir que el agua pase a través de ella.

El procedimiento consiste en lo siguiente:

1. La probeta, en su molde de compactación, se coloca en una bandeja de aluminio y se cubre con una placa de bronce.
2. Un medidor de cuadrante se monta sobre la probeta de tal manera que su guía toque la placa de bronce.
3. Una cantidad específica de agua es vertida dentro del molde directamente sobre la placa de bronce.
4. La distancia entre el labio superior y del molde y la superficie del agua es medida y su valor es registrado.
5. La probeta se deja reposar sumergida por 24 horas.
6. Se toma una lectura del medidor de cuadrante. Esta lectura indica cuanto se ha elevado la superficie de la probeta debido a la expansión.
7. La distancia entre el labio superior del molde y la superficie del agua es medida nuevamente. La diferencia entre esta medida y la medida tomada inicialmente (24 horas antes) indica la cantidad de agua que se ha filtrado en la briqueta. Por lo tanto, esta diferencia es una medida de la permeabilidad de la briqueta.

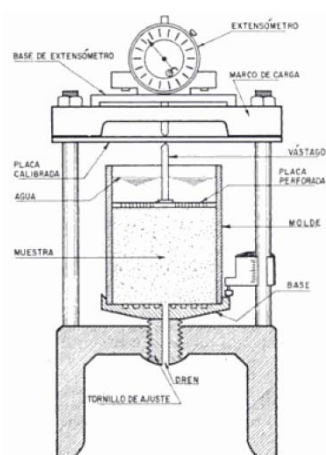


Figura 16: Equipo de prueba de expansión. [11]

3.4 Parámetros Volumétricos. [6]

Un factor que debe ser tomado en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de las proporciones volumétricas del asfalto y de los componentes del agregado; o más simplemente, parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica. Este capítulo describe el análisis volumétrico de una Mezcla Asfáltica en Caliente(HMA), el cual juega un rol significativo en muchos procedimientos de diseño de mezclas.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado vacíos de aire (VA); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (Pbe) proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica. Es necesario entender las definiciones y los procedimientos analíticos para poder tomar decisiones concernientes a la selección del diseño de mezclas asfálticas. La información aplica tanto a mezclas elaboradas en laboratorio, como a probetas asfálticas extraídas en el campo.

3.4.1 Definiciones.

El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto a un grado variable. Además, el cociente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Los tres métodos para medir la gravedad específica del agregado toman estas variaciones en consideración. Estos métodos son, la gravedad específica neta, la aparente y la efectiva:

Gravedad específica neta, Gsb.- Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada Figura 17.



Gravedad específica aparente, G_{sa} .- Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada Figura 17.

Gravedad específica efectiva, G_{se} .- Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada Figura 17.

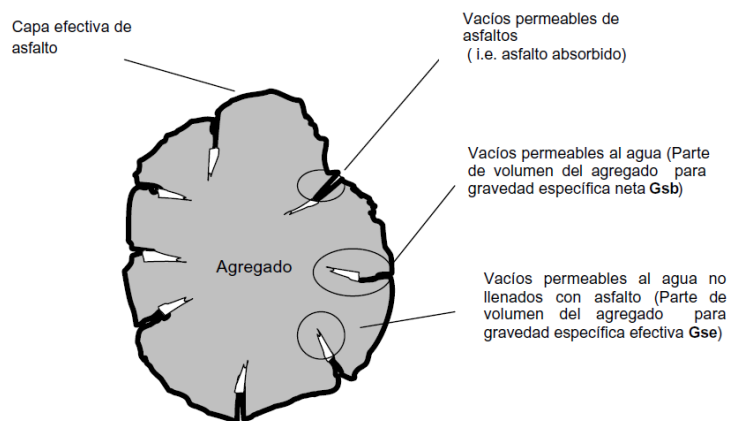


Figura 17: Ilustración de los parámetros de diseño volumétrico. [6]

Vacíos en el agregado mineral, VMA.- Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra Figura 18.

Contenido de asfalto efectivo, P_{be} .- Contenido de asfalto total de una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

Vacíos de aire, VA.- Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado Figura 18.

Vacíos llenados con asfalto, VFA.- Porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la porción de $(VMA - VA)$ entre VMA. Figura 18.

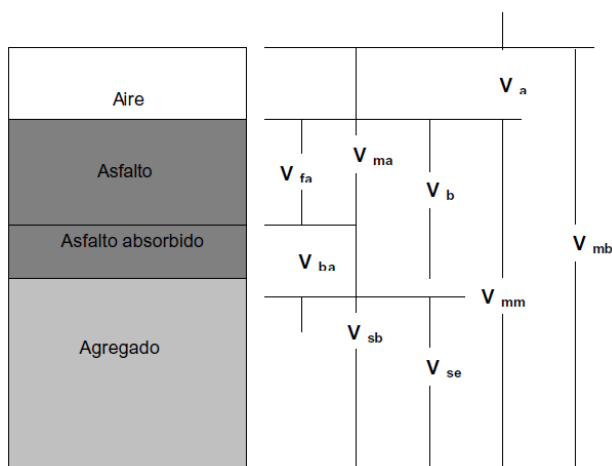


Figura 18: Componente del diagrama de compactación de una Mezcla Asfáltica en Caliente (HMA). [6]

- + VMA = volumen de vacíos en agregado mineral.
- + VMB = volumen total de la mezcla asfáltica.
- + VMM = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.
- + VFA = volumen de vacíos llenados con asfalto.
- + VA = volumen de vacíos de aire.
- + VB = volumen de asfalto.
- + VBA = volumen de asfalto absorbido.
- + VSB = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa).
- + VSE = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva).

El procedimiento de diseño de mezcla, calcula los valores de VMA para las mezclas de pavimento en términos de la gravedad específica neta de los agregados, GSB.

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (VA), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo.

Dependiendo de cómo se especifica el contenido de asfalto, el contenido de asfalto efectivo puede ser expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica o como porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

Debido a que el vacío de aire, VAM y VFA son cantidades de volumen; una mezcla asfáltica, primero debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para propósitos de diseño, este acercamiento volumétrico puede ser fácilmente cambiado a valores masas, para proveer una mezcla de diseño.

3.4.1.1 Gravedad específica neta del agregado.

Cuando el agregado total consiste en fracciones separadas de agregado



grueso, agregado fino, y filler, todos tienen diferentes gravedades específicas, la gravedad específica neta para el agregado total se calcula usando:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

donde:

- + Gsb = gravedad específica neta para el agregado total.
- + P1, P2, Pn = porcentajes individuales por masa de agregado.
- + G1, G2, Gn = gravedad específica neta individual del agregado.

La gravedad específica neta del filler es difícil de determinar correctamente. De cualquier modo, si la gravedad específica aparente del filler es estimada, el error es usualmente insignificante.

3.4.1.2 Gravedad específica efectiva del agregado.

Cuando se basa en la gravedad específica máxima de una mezcla de pavimento, Gmm, la gravedad específica efectiva del agregado, Gse, incluye todos los espacios de vacíos en las partículas del agregado, excepto aquellos que absorben el asfalto. Gse se determina usando:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

donde:

- + Gse = gravedad específica efectiva del agregado.
- + Gmm = gravedad específica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T 209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire).
- + Pmm = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100.
- + Pb = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209 desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla.
- + Gb = gravedad específica del asfalto.

El volumen de asfalto absorbido por los agregados es casi invariablemente menor que el volumen de agua absorbida. Por tanto, el valor para la gravedad específica efectiva de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta y su gravedad específica aparente. Cuando la gravedad específica efectiva sale de estos límites, su valor se debe asumir como incorrecto. El cálculo de la gravedad específica máxima de la mezcla mediante la ASTM D 2041/ASSHTO T 209; la composición de la mezcla en términos del contenido de agregado; y el total de asfalto se deben entonces, volver a inspeccionar para encontrar la causa del error.



3.4.1.3 Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

En el diseño de una mezcla asfáltica para un agregado dado, se necesitará la gravedad específica máxima, G_{mm} , para cada contenido de asfalto con el fin de calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Mientras que la gravedad específica máxima puede determinarse para cada contenido de asfalto mediante ASTM D 2041/ASSHTO T 209, la precisión del ensayo es mejor cuando la mezcla está cerca del contenido de asfalto de diseño. Además, es preferible medir la gravedad específica máxima por duplicado o triplicado.

Después de calcular la gravedad específica efectiva del agregado para cada gravedad específica máxima medida y promediando los resultados del G_{se} ; la gravedad específica máxima para cualquier otro contenido de asfalto puede ser obtenida con la siguiente ecuación, la cual supone que la gravedad específica efectiva del agregado es constante, y ésta es válida puesto que la absorción del asfalto no varía apreciablemente con los cambios en el contenido de asfalto.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

donde:

- + G_{mm} = gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).
- + P_{mm} = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100.
- + P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla.
- + P_b = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla.
- + G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.
- + G_b = gravedad específica del asfalto.

3.4.1.4 Absorción del asfalto.

La absorción se expresa como un porcentaje de la masa del agregado, más que como un porcentaje del total de la masa de la mezcla.

La absorción del asfalto, P_{ba} , se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \times G_b$$

donde:

- + P_{ba} = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.
- + G_{se} = gravedad específica efectiva del agregado.
- + G_{sb} = gravedad específica neta del agregado.
- + G_b = gravedad específica del asfalto.



3.4.1.5 Contenido de asfalto efectivo.

El contenido de asfalto efectivo, P_{be} , de una mezcla de pavimento es el volumen total de asfalto, menos la cantidad de asfalto perdido por absorción dentro de las partículas del agregado. Es la porción del contenido total de asfalto que se queda como una capa en el exterior de la partícula del agregado y es el contenido de asfalto que gobierna el desempeño de una mezcla asfáltica. La fórmula es:

$$P_{be} = Fb - \frac{Pba}{100} \times Ps$$

donde:

- + P_{be} = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.
- + Pb = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla.
- + Pba = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.
- + Ps = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

3.4.1.6 Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.

Los vacíos en el agregado mineral, VMA, se definen como el vacío intergranular entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total. El VMA puede calcularse sobre la base de la gravedad específica neta del agregado y expresado como un porcentaje del volumen mezcla asfáltica compactada. Por lo tanto, el VMA puede estimarse restando el volumen del agregado determinado por su gravedad específica neta, del volumen neto de la mezcla asfáltica compactada.

Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{Gmb \times Ps}{Gsb}$$

donde:

- + VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).
- + Gsb = gravedad específica neta del total de agregado.
- + Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166).
- + Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

O, si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado:



$$VMA = 100 - \frac{Gmb}{Gsb} \times \frac{100}{100 + Pb} \times 100$$

donde:

+ Pb = contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado.

3.4.1.7 Porcentaje de vacíos de aire.

Los vacíos de aire, Va, en la mezcla asfáltica compactada consiste en los pequeños espacios de aire entre las partículas de agregado. El porcentaje del volumen de vacíos de aire en una mezcla compactada, puede determinarse usando:

$$VA = 100 \times \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

donde:

+ VA = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

+ Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

+ Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

3.4.1.8 Porcentaje de vacíos llenos de asfalto.

El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - VA}{VMA}$$

donde:

+ VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA.

+ VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total.

+ VA = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

3.5 Semejanzas y Diferencias entre los métodos.

La selección del diseño final de la mezcla es usualmente la más económica y la que cumple satisfactoriamente con todos los criterios y normas establecidos para el diseño de mezclas asfálticas, es por esta razón que cualquiera de los tres métodos descritos anteriormente puede ser utilizado en el diseño de mezclas.

A continuación se exponen algunas diferencias y semejanzas entre los tres métodos:

3.5.1 Diferencias.- Entre las principales tenemos:

La diferencia más significativa de diseño radica en los equipos utilizados para realizar la compactación de la mezcla asfáltica, los cuales tienen mecanismos de compactación muy diferentes (Figura 19).

Un parámetro que se debe determinar antes de empezar la compactación, es el número de giros (método SUPERPAVE), o de golpes por cara (método Marshall); para su determinación, se requiere conocer el tránsito vehicular (en ESAL) y la temperatura del lugar.

El compactador giratorio (método SUPERPAVE), tiene mayor versatilidad que el martillo Marshall para elaborar probetas asfálticas con diferentes relaciones de altura-diámetro, lo que permite realizar más pruebas mecánicas.

El compactador giratorio (SUPERPAVE), posee la capacidad de lograr mayores densidades que el compactador Marshall.

La granulometría debe cumplir con las dos especificaciones de diseño; gráfica en escala semilogarítmica (método Marshall) y gráfica de Fuller que está elevada a la potencia 0.45 (método SUPERPAVE).

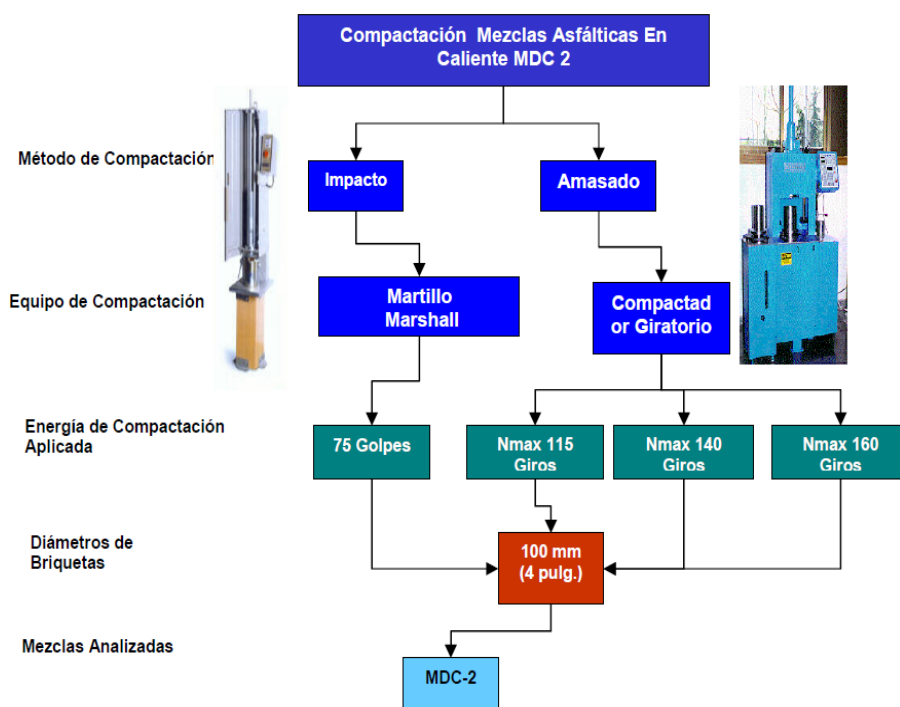


Figura 19: Diferencias entre los métodos Marshall y SUPERPAVE. [12]

La única restricción de la granulometría Marshall es que las curvas granulométricas deben estar dentro de la zona establecida por las curvas de



especificación máxima y mínima.

La granulometría SUPERPAVE cuenta con restricciones diferentes como son los puntos de control; éstos tienen una función similar a las curvas máximas y mínimas del método Marshall.

Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad-análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados.

Otro aspecto a considerar en la granulometría SUPERPAVE es la zona de restricción, la cual no debe ser atravesada por la curva granulométrica debida a que produciría una mezcla muy susceptible a la rigidez del asfalto.

Cabe mencionar que el proceso de diseño Marshall no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos, en cambio el método SUPERPAVE evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfaltos) y su interacción cuando están mezclados.

La estabilidad Hveem es una medida directa de la componente de fricción interna de la resistencia al corte. Mide la capacidad de una probeta de ensayo a resistir un desplazamiento lateral por la aplicación de una carga vertical.

El compactador por amasado y el estabilómetro de Hveem es mucho más caro que el equipo que se utiliza en el método Marshall y no es muy transportable.

El método de selección del contenido de asfalto es demasiado subjetivo y podría resultar en una mezcla bituminosa no durable con muy poco asfalto.

3.5.2 Semejanzas.- Entre las principales tenemos:

Los tres métodos son aplicables para el diseño de mezclas asfálticas en caliente para pavimentación.

Se consideran el tráfico previsto para el diseño, el periodo de diseño y el clima.

El paso fundamental de los tres métodos involucra la selección cuidadosa de los materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos.

El análisis volumétrico común a los métodos Marshall y Hveem proporciona la base para el método de diseño de mezcla SUPERPAVE.

El método de laboratorio de compactación es una muy buena simulación de las características de densificación de la mezcla asfáltica de un pavimento real.

CAPÍTULO IV.



4. Aplicación Práctica de los Métodos de Diseño.

Con los tres métodos de diseño de mezclas asfálticas en caliente, descritos en el capítulo 3, se presenta a continuación una aplicación práctica, realizada por la Secretaría de Comunicaciones y Transporte del Instituto Mexicano del Transporte en su publicación técnica N° 246 titulada: “Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas”, con el fin de extraer conclusiones sobre los métodos de diseño.

4.1 Métodos de Diseño Marshall y SUPERPAVE. [6]

Se realiza una comparación entre las metodologías Marshall y SUPERPAVE a nivel de diseño volumétrico, siguiendo tres parámetros fundamentales: caracterización de materiales, elaboración de las probetas asfálticas y pruebas de densidad a la mezcla asfáltica.

4.1.1 Caracterización de los materiales.

En esta etapa se realizaron pruebas en los materiales utilizados, como son el agregado mineral y el ligante asfáltico.

4.1.1.1 Agregado mineral.

El material granular en estudio proviene del banco de materiales La Cañada, Saldarriaga, México y está compuesto de roca basáltica triturada. De igual forma, se evaluó la calidad de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas; los resultados se observan en la Tabla 15.

Tabla 15: Pruebas al agregado mineral. [6]

Pruebas	Resultado	Especificación
Angularidad del agregado grueso	100 / 100	100 / 100
Partículas alargadas y aplanadas	2 %	10 % máx
Equivalente de arena	75 %	50 % mín
Desgaste de Los Ángeles	16 %	35 % máx
Intemperismo acelerado	7 %	10 % máx

Las pruebas adicionales realizadas a los agregados, fueron absorción, densidad específica y aparente tanto al agregado grueso como al fino. Los resultados se presentan en la Tabla 16.



Tabla 16: Pruebas adicionales al agregado mineral. [6]

Pruebas	Resultado
Absorción (%)	3.01
Densidad	2.70
Densidad aparente	2.78

4.1.1.2 Cemento asfáltico.

Se realizaron dos tipos de pruebas al ligante, de acuerdo con la metodología Superpave, las cuales se describen a continuación:

- Viscosímetro rotacional (RV).**- Se realizaron pruebas de viscosidad a diferentes temperaturas con el fin de obtener las temperaturas de mezclado y compactación; en la Figura 20 se presenta la carta de viscosidad en donde observa que los rangos de valores de mezclado y de compactación son de 143 – 147°C y 135 – 140°C, respectivamente.

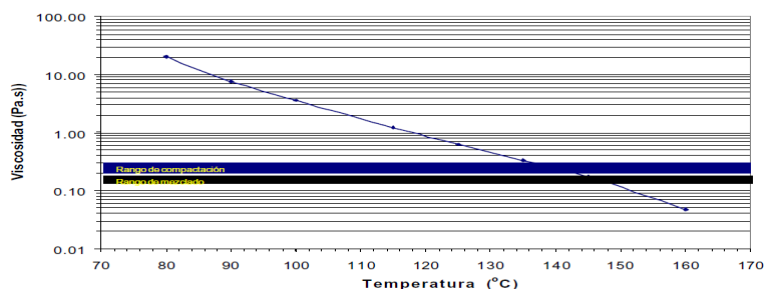


Figura 20: Carta de viscosidad. [6]

- Reómetro dinámico de corte (DSR).**- Conjuntamente se determinó la viscoelasticidad del cemento asfáltico, determinando su grado de desempeño (PG). El resultado que se obtuvo en esta prueba se muestra en la Tabla 17 tomando como parámetros de evaluación el ángulo de fase, módulo de corte (G^*) y el criterio de evaluación $G^*/\text{Sen}(\delta)$.

Tabla 17: Resultados del reómetro de corte directo. [6]

Parámetros	Ligante
	AC - 20
Ángulo de fase (grados)	84,61
Módulo de corte (G^* , kPa)	1,515
$G^* / \text{Sen}(\delta)$, (kPa)	1,522
PG	64

4.1.2 Elaboración de la mezcla asfáltica.



Después de haber realizado las pruebas correspondientes al material granular y verificar que cumple con las especificaciones mínimas se procedió a separarlo por tamaños; el máximo nominal del agregado, fue de 12.57 mm, que es un tamaño común en carpetas asfálticas.

4.1.2.1 Determinación de la granulometría.

La granulometría se seleccionó teniendo en cuenta que debería cumplir con las dos especificaciones de diseño; gráfica en escala semilogarítmica (método Marshall) y gráfica de Fuller que está elevada a la potencia 0.45 (método SUPERPAVE). Para esto se propusieron tres curvas granulométricas: corresponden a una granulometría gruesa (G1) y dos granulometrías finas (G2 y G3). Las curvas granulométricas se pueden observar en las Figuras 21 y 22.

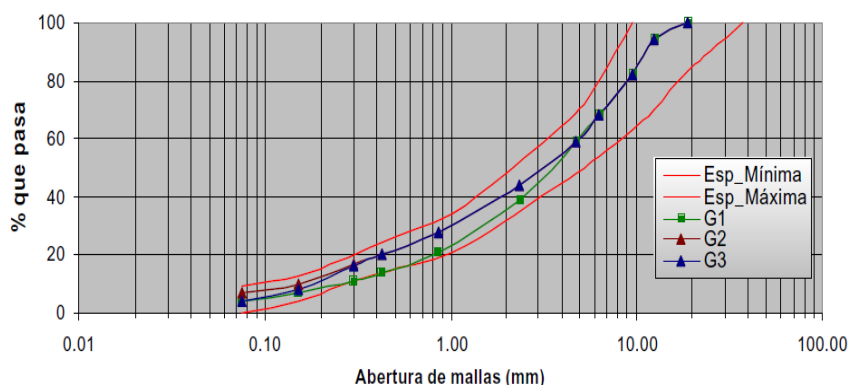


Figura 21: Granulometría Marshall. [6]

Como se observa en la Figura 21, la única restricción de la granulometría Marshall es que las curvas granulométricas deben estar dentro de la zona establecida por las curvas de especificación máxima y mínima.

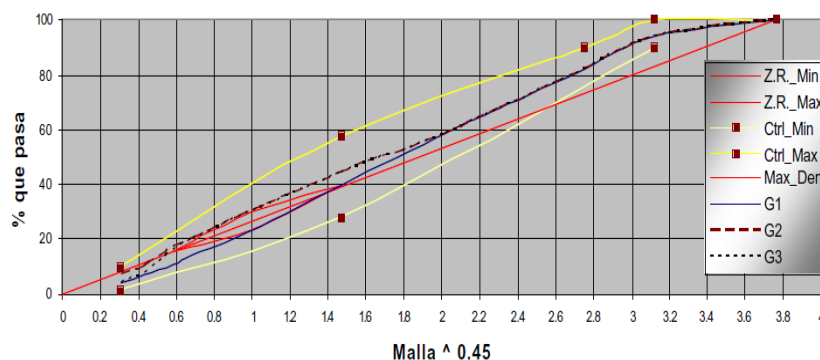


Figura 22: Granulometría SUPERPAVE. [6]

La granulometría SUPERPAVE cuenta con restricciones diferentes como son los puntos de control; éstos tienen una función similar a las curvas máximas y



mínimas del método Marshall; otro aspecto a considerar es la zona de restricción, la cual no debe ser atravesada por la curva granulométrica debido a que produciría una mezcla muy susceptible a la rigidez del asfalto.

4.1.2.2 Contenido de asfalto inicial.

Después de separar el material y definir las granulometrías, se determinó el porcentaje de asfalto inicial; para esto, se utilizó la fórmula de aproximación que establece la metodología SUPERPAVE, que para fines de diseño es más apropiada que la propuesta en la metodología Marshall, dando como resultado un porcentaje de 5.1 % para la mezcla gruesa (G1) y 5.0 % para las mezclas finas (G2 y G3).

4.1.2.3 Dosificación de las probetas.

Para la investigación se decidió utilizar el molde de 10 cm de diámetro, debido a que este tipo de probetas son compatibles en los dos métodos de compactación.

La determinación de las alturas de las probetas va en función de tipo de prueba que se quiera realizar en la mezcla asfáltica. Para esto se manejaron dos tipos de alturas de probeta:

- ✚ Altura de 63.5 mm; para determinar la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, estabilidad y flujo Marshall y tensión indirecta.
- ✚ Altura de 100 mm (1:1); estas probetas se elaboran para la prueba de inmersión-compresión, que es un parámetro de susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica.

4.1.2.4 Preparación de la mezcla asfáltica compactada.

Para elaborar la mezcla, se llevó al asfalto a la temperatura de mezclado; y para el agregado, una temperatura mayor que la del asfalto, pero sin exceder de 28°C la temperatura de mezclado del asfalto; al igual que el asfalto a utilizar, no debe ser calentado a la temperatura de mezclado por más de una hora.

- ✚ **Preparación.-** Cuando los materiales alcanzan las temperaturas deseadas, se prepara el agregado para recibir el cemento asfáltico, haciendo una especie de cráter en donde se coloca el asfalto (Figura 23) y se mezcla hasta que todas las partículas de agregado estén cubiertas de asfalto. De igual forma, el molde de compactación debe ser calentado (en el horno) para que alcance una temperatura aproximada a la de compactación (136 – 139 °C).



Figura 23: Preparación del agregado. [6]

Una vez que la mezcla asfáltica alcanza la temperatura de mezclado, se saca el molde del horno; se coloca el papel en la parte inferior interna del molde y se vacía la mezcla asfáltica (Figura 24); con una espátula o cuchara caliente se golpea 15 veces el perímetro del molde y diez veces en el interior; después se compacta la muestra, ya sea en el martillo Marshall o en el compactador giratorio.



Figura 24: Vaciado de la mezcla al molde (Izq. SUPERPAVE y Der. Marshall). [6]

✚ **Compactación de la mezcla asfáltica.-** Un parámetro que se debe determinar antes de empezar la compactación, es el número de giros (método SUPERPAVE), o de golpes por cara (método Marshall); para su determinación, se requiere conocer el tránsito vehicular (en ESAL) y la temperatura del lugar. En esta investigación se estableció un tránsito de 15×10^6 ESAL y una temperatura de pavimento de hasta 39°C . Con estos valores se pudo determinar un número de giros de 174 (SUPERPAVE) y de 75 golpes por cara (Marshall).

- **Compactación SUPERPAVE.-** Además de los parámetros antes determinados, la compactación giratoria requiere de ciertos valores como son la presión vertical, ángulo de giro y la velocidad de rotación: en este

caso, se tomaron los especificados para el diseño (Tabla 18).

Tabla 18: Especificación SUPERPAVE. [6]

Parámetros	Especificación
Esfuerzo vertical	600 kPa
Ángulo de giro	1.25 °
Velocidad de rotación	30 rev/min

Todos estos parámetros son introducidos al software del compactador, al igual que los datos propios de la mezcla asfáltica, como son el nombre de la probeta, peso, densidad esperada y diámetro del molde. Una representación se presenta en la Figura 25.

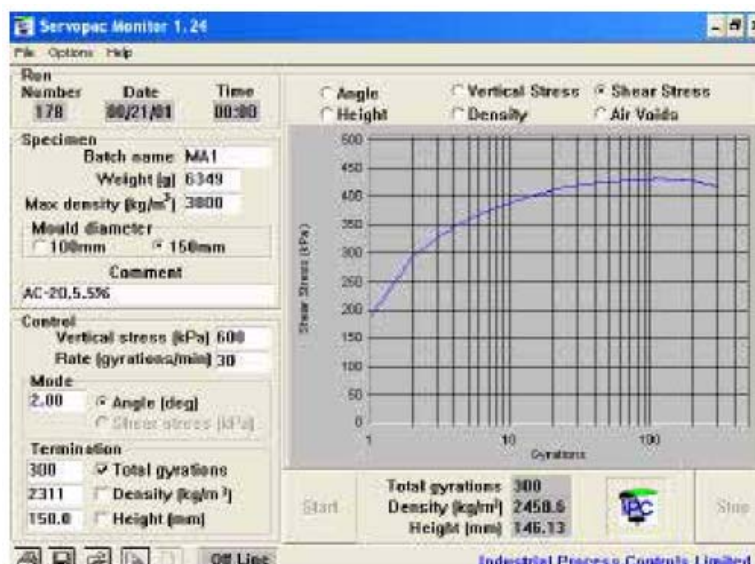


Figura 25: Datos generales y grafica en el compactador Servopac. [6]

Antes de iniciar la compactación se asegura el molde en el compactador y después se inicia el proceso (Figura 26), el molde a utilizar deberá tener una temperatura aproximada a la de compactación, con el fin de reducir la pérdida temperatura durante la compactación.



Figura 26: Colocación del molde. [6]



Durante la compactación, el software del Servopac presentará gráficas de números de giros contra diferentes parámetros, como la variación del ángulo de giro, esfuerzo de corte, densidad, volumen de vacíos.

- **Compactación Marshall.-** La compactación Marshall es mucho más sencilla, ya que sólo requiere de la determinación del número de golpes por cara. La Figura 27 muestra una compactación con martillo Marshall; el martillo debe de ser calendo para que alcance una temperatura aproximada a la de compactación.



Figura 27: Compactación Marshall. [6]

- ✚ **Extracción de la mezcla asfáltica compactada:** Se describe para los dos métodos descritos.
- **Método SUPERPAVE.-** El compactador giratorio cuenta con un sistema de extracción (Figura 28), que es un gato hidráulico que expulsa a la muestra del molde. Para extraerla se tiene que dejar enfriar la muestra por lo menos una hora para no ocasionarle daño alguno; esto porque a altas temperaturas la mezcla asfáltica compactada no tiene la cohesión suficiente y podría afectarse su volumetría.
- **Método Marshall.-** Para la extracción de la mezcla asfáltica después de compactarla se utilizó un gato hidráulico. A diferencia de los moldes SUPERPAVE, el espesor del molde Marshall es muy delgado, por lo que se tiene que esperar menos tiempo para extraer la probeta (aprox. 30 min) (Figura 28).



Figura 28: Extracción: SUPERPAVE y Marshall. [6]



4.1.3 Pruebas a las mezclas asfálticas.

Para analizar la influencia del método de compactación, se utilizarán diferentes tipos de pruebas en la mezcla asfáltica, las cuales estarán divididas en dos fases; la primera, con el fin de evaluar las características volumétricas debidas a los diferentes equipos de compactación utilizados; en la segunda, se valorarán los parámetros de resistencia de la mezcla asfáltica mediante diferentes pruebas mecánicas con el fin de calificar la influencia de la compactación, bajo diferentes condiciones de falla.

4.1.3.1 Pruebas volumétricas.

Un factor que debe tenerse en cuenta al considerar el comportamiento de la mezcla asfáltica es el de las proporciones volumétricas de los componentes, el ligante asfáltico y el agregado. A continuación se describen las pruebas que más influyen en los resultados de la volumetría y los parámetros a evaluar en este estudio.

- ✚ **Gravedad específica teórica máxima (Gmm).**- La determinación de la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, es posiblemente la prueba de laboratorio más importante para definir las características volumétricas de la mezcla asfáltica, debido a que el cálculo del volumen de vacíos es la proporción que existe entre el G_{mb} y el G_{mm} . Para esta prueba se utiliza un picnómetro de vacío según la Norma ASTM D2041 (Figura 29). Se realiza en la mezcla asfáltica en forma suelta y consiste en saturar de agua el picnómetro y aplicar vacío, con el fin de extraer todo el aire que contiene la mezcla.



Figura 29: Picnómetro de Vacío. [6]

Para calcular la gravedad teórica máxima de la mezcla asfáltica, se utiliza la fórmula siguiente:



$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C}$$

donde:

- G_{mm} = gravedad específica teórica máxima
- A = masa de la muestra seca, g.
- B = masa del picnómetro con agua a 25 °C, g.
- C = masa del picnómetro con agua y muestra a 25 °C, g.

Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (G_{mb}).- Esta prueba se realiza para estimar el grado de densificación que tendrá la mezcla asfáltica colocada en la estructura del pavimento. Debe tenerse en cuenta que esta densificación es el valor estimado que tendrá la mezcla asfáltica después de un tiempo de haberse colocado en el pavimento. Esto debido a que el pavimento después de ser colocado, sigue sufriendo densificación debido al paso de los vehículos. Esta densidad es la relación entre su peso en el aire y su volumen, incluyendo los vacíos permeables. Si la probeta tiene una absorción menor a 2 %, no se necesita parafinar la probeta (ASTM D2726), su peso específico (G_{mb}) se determina de manera sencilla, mediante la expresión:

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_{ss} - W_w}$$

donde:

- W_a = masa de la probeta en el aire.
- W_w = masa de la probeta en el agua.
- W_{ss} = masa en el aire de la probeta saturada y superficialmente seca.

En la Figura 30 muestra la habilitación de la báscula para el pesaje de las probetas en forma sumergida, al aire y superficialmente seca.



Figura 30: Determinación de las masas de las mezclas asfálticas. [6]



- ✚ **Vacíos de aire (VA).**- Para este parámetro la especificación establece un rango de 3 a 5 % de vacíos de aire. Mediante la siguiente expresión:

$$VA = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

donde:

- VA = porcentaje de vacíos de aire (%).
- G_{mm} = gravedad específica teórica máxima.
- G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

- ✚ **Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).**- Si la composición de la mezcla se determina como el porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

donde:

- VMA = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).
- G_{sb} = gravedad específica neta del total de agregado.
- G_{mb} = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166).
- P_s = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica.

O, si la composición de la mezcla es determinada como el porcentaje de la masa del agregado:

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times \frac{100}{100 + P_b} \times 100$$

donde:

- P_b = contenido de asfalto, porcentaje de la masa del agregado.

- ✚ **Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA).**- El porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que son llenados por el asfalto, VFA, no incluyendo el asfalto absorbido, se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - VA}{VMA}$$

donde:



- VFA = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VMA.
- VMA = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total.
- VA = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total.

4.1.3.2 Pruebas mecánicas.

Se realizan los siguientes ensayos a las probetas.

✚ **Prueba de Inmersión-compresión.-** Esta prueba se realiza de acuerdo con la Norma ASTM D1075 y se utiliza para determinar la pérdida de resistencia debido a la acción del agua. Esta determinación consiste en realizar dos juegos de probetas; las primeras, se evalúan en compresión a una temperatura de 25 °C; el segundo juego se sumerge en agua a una temperatura de 60 °C durante 24 horas; después se vuelve a sumergir en agua a 25 °C por 2 horas; finalmente se seca superficialmente la muestra y se evalúa en compresión a una temperatura de 25 °C.

La determinación de la velocidad de deformación es igual a la de la prueba de compresión axial sin confinar; la pequeña diferencia es que las probetas tienen diferente relación altura-diámetro (1:1), por lo que se utilizó una velocidad de deformación de 5 mm/min.

✚ **Prueba de estabilidad y flujo Marshall.-** Esta prueba se realiza con el propósito de conocer los valores de cohesión (estabilidad) y fricción (flujo) de la mezcla asfáltica, mediante la aplicación de una carga a deformación controlada de 50.8 mm/min.

Esta prueba es solamente para probetas fabricadas con el martillo Marshall y consiste en sumergir la probeta en baño María a una temperatura de 60 °C de 30 a 40 min, para después ensayarla en la máquina Marshall, los valores obtenidos se utilizan para la determinar el contenido óptimo de asfalto.

4.1.4 Resultados.

La investigación se dividió en dos etapas, una que incluye el análisis volumétrico; y otra, que involucra las pruebas mecánicas a la mezcla asfáltica compactada, para cada método de diseño.

4.1.4.1 Análisis volumétrico.

El análisis volumétrico está subdividido en tres etapas, las cuales son determinación de la selección de la granulometría de diseño, selección del contenido óptimo de asfalto, propiedades en el óptimo de asfalto.

Los parámetros a evaluar en esta etapa serán: vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos rellenos de asfalto (VFA); volumen de vacíos (VA); porcentaje de



asfalto efectivo (Pbe); proporción de polvo (DP); gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada (Gmb); densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica (Gmm), absorción de la mezcla asfáltica.

A estos se le adicionarán los parámetros propios de los métodos de diseño, como son estabilidad y flujo del método Marshall, y % de Gmm para el método SUPERPAVE.

Selección de la granulometría de diseño.- En la Tabla 19 se presentan los datos obtenidos para el método de diseño SUPERPAVE.

Tabla 19: Análisis de las granulometrías para el método SUPERPAVE. [6]

Parámetros	Para 174 giros			Especificación
	G1	G2	G3	
Pbi (est)	5.60	5.40	6.00	-----
VMA (est)	14.9	15.1	16.0	14 (mín)
VFA (est)	73.2	73.5	75.0	65 – 75
% Gmm Nini (est)	87.4	87.9	87.8	87 (mín)
% Gmm Nmax (est)	97.2	97.2	97.2	98 (máx)
Pbe	4.8	4.8	5.3	-----
DP	0.84	1.46	0.75	0.6 – 1.2
Gmb	2.397	2.408	2.384	
Gmm	2.497	2.500	2.487	
Absorción (%)	1.24	0.91	0.47	

Se puede observar que la granulometría 2 (G2) no cumple con el parámetro de proporción de polvo, por lo que se descartará del diseño. De las dos granulometrías restantes se seleccionó la granulometría 1 (G1), debido a que la granulometría 3 (G3) estaba muy cerca de la especificación de VFA. Otros parámetros a observar son la densidad Gmb y la absorción, ya que al ser granulometrías densas, los porcentajes de absorción son muy bajos.

De la misma forma, en la Tabla 20 se presentan los resultados del método Marshall, con tendencias similares a los del método Superpave debido a la homogenización de las curvas granulométricas.

Tabla 20: Análisis de la granulometría para el método Marshall. [6]

Parámetros	75 golpes por cara			Especificación
	G1	G2	G3	
Pbi (est)	5.7	5.50	6.00	-----
VMA (est)	15.0	15.3	15.9	14 (mín)
VFA (est)	73.3	73.9	74.8	65 – 75
Pbe	4.9	4.9	5.3	-----
DP	0.82	1.43	0.75	0.6 – 1.2
Flujo	16	13	13	8 – 14
Estabilidad (kN)	20197	26315	24766	8000 (mín)
Gmb	2.361	2.370	2.345	
Gmm	2.450	2.450	2.508	
Absorción (%)	1.22	0.77	0.31	

Al igual que en el análisis anterior, la granulometría 2 (G2) se descarta por exceso en el valor de proporción de polvo; de las granulometrías restantes, se deben observar dos parámetros; en la granulometría 3 (G3), el valor de VFA está próximo al límite superior de la especificación de VFA; por otro lado, la granulometría 1 (G1) no cumple con la especificación de flujo. Para este análisis en particular se tomarán en cuenta solamente los parámetros volumétricos, por tanto, se utilizará la granulometría 1.

- ✚ **Determinación del contenido óptimo de asfalto.-** Para determinar el contenido óptimo de asfalto, se evaluó la granulometría 1 (G1) con diferentes contenidos de asfalto (estimado, ± 0.5 y 1.0 %); los resultados se observan en las gráficas siguientes.
- **Método Marshall.-** Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto, de la gráfica de V_a vs % de asfalto se entra con el valor de 4% de V_a y al interceptar con la curva se determina el porcentaje de asfalto a evaluar. El 4% de vacíos es la media para el diseño de mezclas asfálticas, ya que la especificación sugiere un valor entre 3 y 5.

En la Figura 31 a se observa que el porcentaje de asfalto para un volumen de vacíos de 4 % es de 5.9. Con este valor se entra en las otras gráficas para verificar si cumple con la especificación establecida.

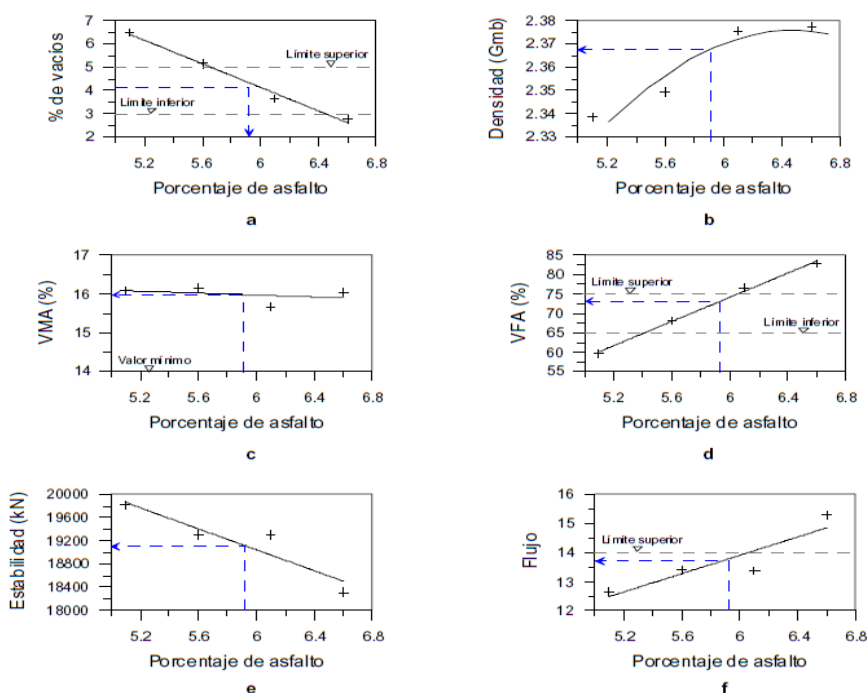


Figura 31: Gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto (Marshall). [6]

- **Método SUPERPAVE.-** Para calcular el porcentaje de asfalto óptimo se utiliza el mismo procedimiento que en el método Marshall, solo que en este caso el porcentaje determinado es 5.3, tal como se muestra en la Figura 32.

Se realizó un concentrado de resultados mediante los dos métodos, Tabla 21. En ella se puede subrayar la diferencia de los porcentajes de asfalto óptimo entre métodos, siendo 0.6 % más para el Marshall; esto debido a las gravedades específicas de la mezcla asfáltica compactada (Gmb), ya que en el método Marshall se presentan densidades más bajas, exponiendo las diferencias entre los métodos de compactación; cabe señalar que las densidades obtenidas en SUPERPAVE, todavía podrían incrementarse; mientras que las Marshall no, debido a que las mezclas asfálticas compactadas ya presentaban indicios de rotura de agregado.

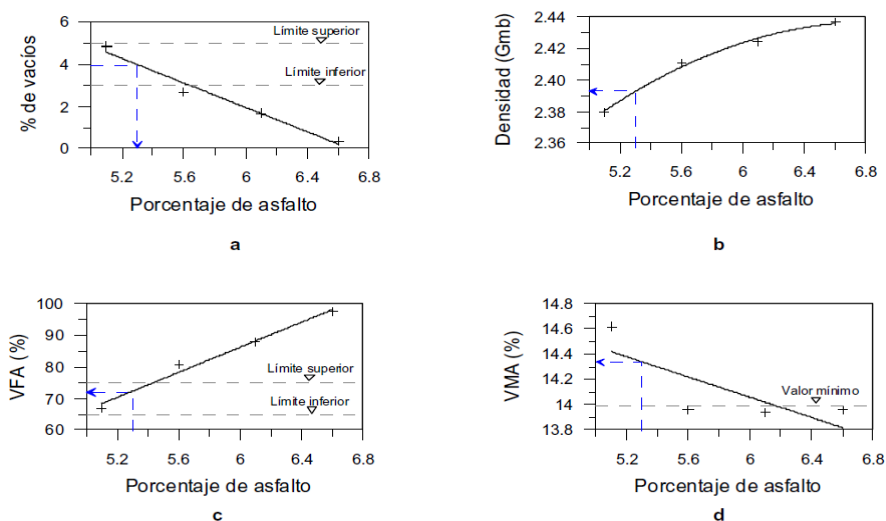


Figura 32: Gráficas para determinar el contenido óptimo de asfalto (SUPERPAVE). [6]

Tabla 21: Comparación de los parámetros volumétricos estimados. [6]

Parámetros	Métodos de diseño	
	Marshall	Superpave
% de asfalto óptimo	5.3	5.9
Gmb	2.366	2.392
VMA (%)	16	14.3
VFA (%)	73	72
Estabilidad (kN)	19100	-----
Flujo	13.6	-----

Los demás parámetros presentaron valores similares, aunque el VMA para el método SUPERPAVE dio cerca del límite.

Propiedades en el óptimo de asfalto.- Con el fin de verificar los valores óptimos de asfalto estimados, se realizaron probetas con los porcentajes estimados, los resultados obtenidos integran la Tabla 22.



Tabla 22: Comparación de los parámetros volumétricos reales. [6]

Parámetros	Métodos de diseño	
	Marshall	Superpave
% de asfalto óptimo	5.3	5.9
Gmb	2.360	2.405
Gmm	2.406	2.501
VMA (%)	16	14
VFA (%)	75	72
Estabilidad (kN)	16204	-----
Flujo	14	-----
Inmersión-compresión	-----	97 %

Con los valores de la tabla anterior se puede determinar que el valor seleccionado de contenido óptimo fue correcto, ya que no existen diferencias significativas en entre los valores estimados y los reales en ninguno de los dos métodos.

El diseño de mezclas asfálticas para el método Marshall presentó un valor de flujo muy cerca de la especificación, lo que indica una fricción interna posiblemente baja, esto puede deberse al porcentaje de asfalto de diseño, el cual es relativamente alto.

El valor de estabilidad de la mezcla asfáltica es muy alto, lo que la hace susceptible al agrietamiento por fatiga. Esto también se puede observar en la prueba de inmersión-compresión, ya que presenta una susceptibilidad al agua casi nula, dejando ver que es una mezcla muy cerrada.

4.2 Método de Diseño Hveem. [11]

Diseñar la estructura de un pavimento flexible empleando el método de Hveem en relación con un camino localizado sobre un terreno constituido por suelos en general de origen volcánico y lo forman limos inorgánicos de mediana plasticidad y de baja a alta compresibilidad (ML y MH) y una alta resistencia. También se encuentran algunas mezclas de suelos y fragmentos pequeños de roca cuyas propiedades son muy variables. Calcular el índice de tráfico para una carretera principal teniendo en cuenta el análisis de tránsito que se indica en la Tabla 24. Considerar una tasa de crecimiento anual de 7%, constante en los diversos tipos de vehículos, y un período de diseño de 10 años.

4.2.1 Evaluación del Tránsito.

Factores de equivalencia, Tabla 23, para ruedas duales de vehículos de varios ejes con la rueda STANDARD de 5000lb.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Tabla 23: Factores de equivalencia. [11]

	FACTORES DE EQUIVALENCIA	ANUAL DE UNA DIRECCION
N de ejes de vehículos	Carreteras principales	Carreteras secundarias
2	280	200
3	930	690
4	1320	1070
5	3190	1700
6	1950	1050

El conocimiento o previsión del tráfico permite fijar el número total de CE para la duración prevista del pavimento, considerado a 10 años. Cabe hacer notar que los factores se refieren al promedio de vehículos circulantes cada día en un solo sentido.

El método considera que la rueda equivalente tiene una presión de inflado de 4.10 kg/cm². El efecto de los automóviles al actuar sobre el pavimento no se toma en cuenta.

Tabla 24: Análisis de tránsito. [11]

tipo de vehículo	VOLUMEN PROMEDIO DIARIO ANUAL DOS DIRECCIONES	VOLUMEN PROMEDIO DIARIO ANUAL UNA DIRECCION	CONSTANTE "CE"		(CE)
A	10576	5288			
B	684	342	280	=	95760
C2	734	367	280	=	102760
C3	116	58	930	=	53940
T2S2	28	14	1320	=	18480
T3S3	102	51	3190	=	162690
TOTAL	12240	6120		ΣCE =	433630

El factor de proyección (Fp) de tránsito para el periodo de 10 años, se obtiene aplicando la fórmula:

$$F_p = \frac{1 + \frac{TDPA_f}{TDPA_i}}{2}$$

donde:

- Fp = Factor de proyección tránsito.
- TDPAf = Tránsito diario promedio anual final.
- TDPAi = Tránsito diario promedio anual inicial.

Como el tránsito crece con una tasa de interés compuesto al 7% anual, se tiene:



$$TDPA_f = TDPA_i (1 + 0.07)^{10}$$

De donde, la relación:

$$\frac{TDPA_f}{TDPA_i} = 2$$

Por lo tanto:

$$Fp = \frac{1 + 2}{2} = 1.5$$

La fórmula para calcular la carga equivalente (CE) es:

$$CE = P \times Fp \times \Sigma CE$$

donde:

- P = es el periodo, de diseño 10 años.

Reemplazando valores en, se tiene carga equivalente:

$$CE = 10 \times 1.5 \times 433630 \quad CE = 6504450$$

El valor del índice de tránsito (IT) es:

$$IT = 6.7 \left(\frac{CE}{10^6} \right)^{0.119} = 6.7 \left(\frac{6504450}{10^6} \right)^{0.119} = 8.5$$

4.2.2 Análisis de los espesores del pavimento.

Se hacen tomando en cuenta los resultados del laboratorio de las pruebas de valor R de estabilidad presión expansión y presión de exudación realizadas en cada una de las tres probetas elaboradas con material del terreno de fundación del camino. Las tres probetas tienen diferentes contenidos de agua.

El espesor de la sección estructural por concepto de R se determinó por la ecuación de eg en la que se utilizó un índice de tránsito de 8.5 y el valor de estabilidad correspondiente a cada probeta ensayada. Se tiene así tres espesores por concepto de R.

De una manera similar se determinaron los tres espesores del pavimento necesarios para equilibrar las presiones de expansión desarrolladas en las probetas de ensayo mediante la aplicación de la expresión de et . En la porción izquierda de la Figura 33 se presenta la curva de espesores por R y expansión en la cual el punto A define el espesor que satisface los requerimientos de la

expansión y de la estabilidad simultáneamente que en este caso es de 30cm de grava equivalente.

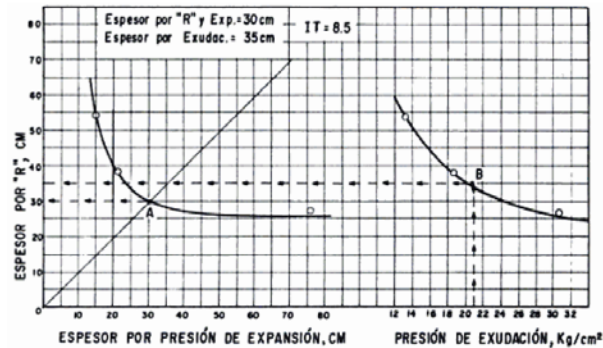


Figura 33: Espesor por presión de expansión y Presión de exudación. [11]

El espesor del pavimento relacionado con la presión de exudación, Figura 33, se determina por medio de la curva espesor de estabilidad contra presión de exudación tomando en cuenta un valor de 21 kg/cm^2 de esta última. El espesor total del pavimento en grava equivalente bajo estas condiciones resulto ser de 35cm.

Al comparar ambos espesores obtenidos se tomara en cuenta en el diseño sección estructural el que sea mayor en este caso resulto ser de 35cm de grava equivalente obtenida de la expresión de presión por exudación.

Para calcular los espesores de la carpeta base y sub-base se procede en la siguiente forma:

4.2.2.1 Carpeta.

En la construcción de carpeta se empleara concreto asfáltico colocado sobre una base de material triturado cuyo valor R se supone de 82 (valor de laboratorio).

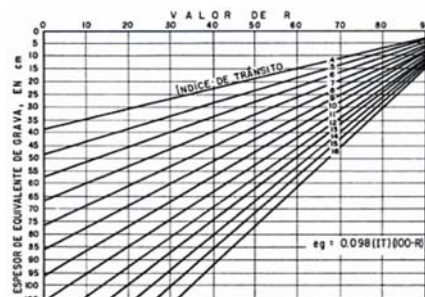


Figura 34: Espesor de grava equivalente. [11]

En el laboratorio que con un índice de tráfico IT de 8.5 y con el ábaco de la



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Figura 34 da un espesor de grava equivalente para la carpeta.

$$e_g = 0.098 (IT)(100 - R) = 0.098 (8.5)(100 - 82) = 14.99$$

Entonces tenemos un espesor de grava equivalente de 15 cm. Mediante el uso de la Tabla 25 se determina un factor de grava.

Tabla 25: Factor de grava. [11]

Factores de grava equivalente para diversas estructuras de pavimentos flexibles (Ref. 42)		
Tipo de material	Índice de tránsito	Factor de grava equivalente
Carpeta de concreto Asfáltico	5	2.5
	6	2.3
	7	2.2
	8	2.0
	9	1.9
	10	1.8
	11	1.7
	12	1.6
	13	1.6
	14	1.5
Bases estabilizadas con asfalto		1.2
Bases tratadas con cemento	A	1.7
	B	1.5
	C	1.2
Bases granulares de material triturado		1.1
Sub-bases y bases granulares naturales		1.0

Para un índice de tránsito de 8.5 obtenemos un factor de grava equivalente de 1.95 para el concreto asfáltico.

El espesor de concreto asfáltico.- Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Espesor de Cº Asfáltico} = \frac{\text{Espesor grava equivalente}}{\text{Factor grava equivalente}} = \frac{15}{1.95} = 7.69 \text{ cm.}$$

Se considera un espesor de 7.5 cm (3").

4.2.2.2 Base.

Se empleara para la base un material triturado de buena calidad con un factor de grava de 1.1 (tabla factor grava equivalente).

El espesor de la base en grava equivalente se determina de la siguiente forma: espesor de la base: $35 - 15 = 20$ cm.

Pero se debe calcular el espesor real de la base, mediante la expresión:



$$\text{Espesor real de la Base} = \frac{\text{Espesor Base}}{\text{Factor grava equivalente}} = \frac{20}{1.1} = 18.5 \text{ cm.}$$

Se considera un espesor de 18.5cm (7.5").

CAPÍTULO V.

Este capítulo ha sido tomado de Cartilla de Pavimentos Asfálticos ASOPAC (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia) y de la publicación Análisis del Método para el Estudio Granulométrico de Áridos de Mezclas Asfálticas de Álvaro R. Alvarado.

5. Control de Calidad.

La calidad de los materiales empleados en la construcción de un pavimento, así como su proceso constructivo, suelen comprobarse mediante un conjunto de pruebas de laboratorio y de campo.

A continuación se indican las pruebas rutinarias de control para las unidades de obra más frecuentes en la construcción de pavimentos flexibles.

5.1 Materiales.

Los métodos de diseño de laboratorio usualmente utilizados Marshall y Hveem, no incorporaban criterios sobre agregados en sus procedimientos, el criterio de agregados está directamente incorporado dentro del procedimiento SUPERPAVE.

5.1.1 Ensayos al agregado mineral.

Los ensayos a los agregados están clasificadas en dos grupos: de consenso y de origen.

5.1.1.1 De consenso.-Estos ensayos son, según [10]:

- ✚ **Angularidad del agregado grueso.-** Esta propiedad asegura el grado de fricción interna de los áridos mayores al tamaño de la malla N°4, además de la resistencia a las cargas de tráfico. Dependen de los requerimientos de la intensidad del tráfico y la definición de partículas chancadas como aquella en que el área de las caras fracturadas debe ser mayor al 25% del área superficial. Los requerimientos son para el porcentaje de partículas con 1 y 2 caras fracturadas y son presentados en la Tabla 26.

Tabla 26: Requerimiento angularidad áridos gruesos. [10]

Tráfico millones ESALs	en de	Profundidad	
		< 100 [mm]	>100 [mm]
< 0,3		55/-	-/-
< 1		65/-	-/-
< 3		75/-	50/-
< 10		85/80	60/-
< 30		95/90	80/75
< 100		100/100	95/90
≥ 100		100/100	100/100

Nota: "85/80" significa que el 85% de los áridos gruesos tiene por lo menos 1 cara fracturada y el 80% tiene 2 o más caras fracturadas.

Angularidad del agregado fino (AASHTO TP 33).- Establece la medida de angularidad de los agregados finos menores a la malla N°8 a través de los vacíos, de modo que un contenido bajo de vacíos indica una alta angularidad, menos partículas esféricas y mayor cantidad de partículas rugosas. El método consiste en llenar un recipiente calibrado de un volumen con arena de 100 cm³, con una muestra de áridos finos que fluye a través de un embudo, para caer sobre el mismo cilindro como se aprecia en la Figura 35. El exceso de material se quita y se registra el peso del árido no compactado como F.



Figura 35: Ensayo angularidad agregado fino. [10]

Finalmente los vacíos sin compactar de la fracción fina se determinan de acuerdo a la siguiente expresión:

$$U = \frac{V - (F/G)}{V} \times 100$$

donde:

- V= Volumen del cilindro.
- F= Masa neta del agregado.
- G= Densidad relativa seca (gravedad específica) del agregado fino.
- U= Vacíos sin compactar en el material en %.

Los requerimientos para esta propiedad se resumen en la Tabla 27.



Tabla 27: Requerimientos angularidad del agregado fino. [10]

Tráfico en millones de ESALs	Profundidad	
	< 100 [mm]	>100 [mm]
< 0,3	-	-
< 1	40	-
< 3	40	40
< 10	45	40
< 30	45	40
< 100	45	45
≥ 100	45	45
Nota: El criterio es presentado como % vacíos de aire en áridos finos ligeramente compactados		

- ✚ **Partículas alargadas y aplanadas (ASTM D4791).**- Los índices son una indicación de la cantidad de material (porcentaje de agregado) cuyas medidas proporcionan una forma demasiado alargada o son demasiado planas para ser utilizadas en una mezcla asfáltica. Esta caracterización está referida a las partículas gruesas mayores a 5 mm. Los requisitos dependen del nivel de tráfico y se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28: Requerimientos partículas alargadas y planas. [10]

Tráfico en millones de ESALs	Porcentaje
< 1	No exige
≥ 1	10
Nota: El criterio es presentado como % máximo en peso de partículas alargadas y planas	

- ✚ **Equivalente de arena (ASTM D2419).**- Es un método para determinar la proporción indeseable de polvo fino y arcilla en la fracción de agregado que pasa el tamiz No. 4 (Tabla 29).

En este ensayo, una muestra de agregado fino se vierte en un cilindro graduado que contiene una solución que separa. El cilindro se agita para separar los finos de arcilla presentes en el agregado. La solución permite la separación del material y éste se sedimenta de manera individual, de modo que las partículas más grandes (arenas) se encuentran en el fondo de la probeta y gradualmente hacia arriba se tienen las partículas en suspensión (partículas plásticas). Después de un período que permita la sedimentación, se mide la altura de arcilla suspendida y la de la arena sedimentada; la relación entre ellas es el equivalente de arena (Figura 36).

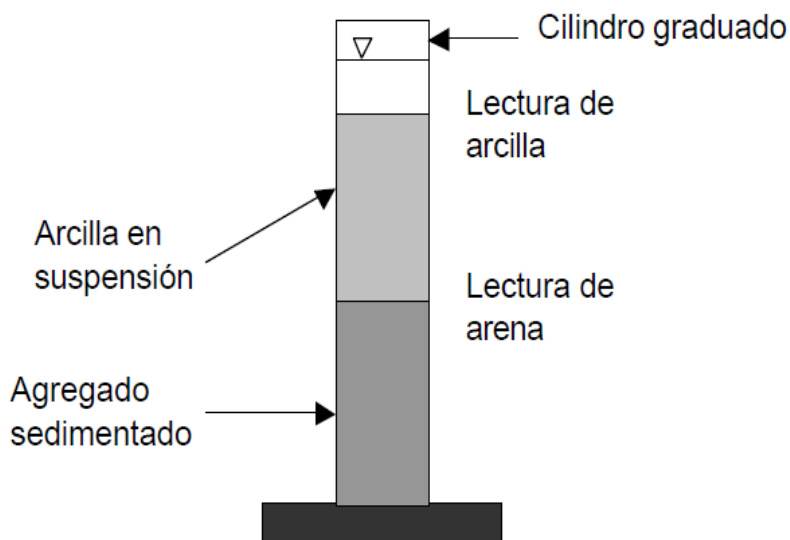


Figura 36: Ensayo equivalente de arena. [9]

Tabla 29: Requerimientos equivalente de arena. [10]

Tráfico en millones de ESALs	Equivalente de arena mínimo
< 3	40
< 30	45
≥ 30	50

5.1.1.2 De origen.- Entre los ensayos más importantes están:

Tenacidad.- La tenacidad es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de abrasión de Los Ángeles, la Norma ASTM D131, "Resistencia al desgaste del agregado grueso de pequeño tamaño mediante el uso de la máquina Los Ángeles".

Este ensayo estima la resistencia del agregado grueso a la abrasión y degradación mecánica durante el manipuleo, construcción y servicio. Se realiza sometiendo al agregado grueso, mayor de 2.36 mm a trituración y abrasión por medio de esferas de acero.

Durabilidad.- Es el porcentaje de pérdida de material en una mezcla de agregados durante el ensayo de durabilidad de los áridos sometidos al ataque con sulfato de sodio o magnesio. La norma es la ASTM C88, "Durabilidad del agregado por medio del uso de sulfato de sodio o magnesio".

Este ensayo estima la resistencia del agregado al deterioro por la acción de los agentes climáticos durante la vida útil del pavimento. Puede aplicarse



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

tanto a agregados gruesos como finos.

✚ **Materiales deletéreos.-** Los materiales deletéreos se definen como el porcentaje en peso de contaminantes como esquistos, madera, mica y carbón mezclado con los agregados. La norma es la AASHTO T 112, "Masa de arcilla y partículas friables en agregados". Puede aplicarse tanto a agregados finos como gruesos.

✚ **Granulometría.-** Cabe mencionar que estos agregados deben cumplir con los requisitos de gradación que se indican en la Tabla 404-5.1 y 405-5.1, (MTOP – 001 – F – 2002).

La granulometría será comprobada mediante ensayo INEN 696, que se efectuará sobre muestras que se tomarán periódicamente de los acopios, de las tolvas de recepción en caliente y de la mezcla asfáltica preparadas.

Tabla 404.5-1 [14]

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través los tamices de malla cuadrada		
	A	B	C
2" (50.8 mm.)	100	--	--
1 1/2" (38.1 mm.)	90 - 100	100	--
1" (25.4 mm.)	--	90 - 100	100
3/4" (19.0 mm.)	56 - 80	--	90 - 100
1/2" (12.5 mm.)	--	56 - 80	--
3/8" (9.5 mm.)	--	--	56 - 80
Nº 4 (4.75 mm.)	23 - 53	29 - 59	35 - 65
Nº 8 (2.36 mm.)	15 - 41	19 - 45	23 - 49
Nº 50 (0.30 mm.)	4 - 16	5 - 17	5 - 19
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 6	1 - 7	2 - 8

Tabla 405.5-1 [14]

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4
1" (25.4 mm.)	100	--	--	--
3/4" (19.0 mm.)	90 - 100	100	--	--
1/2" (12.7 mm.)	--	90 - 100	100	--
3/8" (9.50 mm.)	56 - 80	--	90 - 100	100
Nº 4 (4.75 mm.)	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100
Nº 8 (2.36 mm.)	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100
Nº 16 (1.18 mm.)	--	--	--	40 - 80
Nº 30 (0.60 mm.)	--	--	--	25 - 65
Nº 50 (0.30 mm.)	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40
Nº 100 (0.15 mm.)	--	--	--	3 - 20
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10

5.1.2 Ensayos al cemento asfáltico.[13]

Para evaluar la calidad de un cemento asfáltico y caracterizarlo se han ideado diversos ensayos que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellos.

5.1.2.1 Ensayos para medir la consistencia.

La consistencia es el grado de fluidez que tiene el asfalto a una determinada temperatura.

✚ **Ensayos de viscosidad.-** La viscosidad es la resistencia del material a fluir. No es una propiedad intrínseca del asfalto, es decir, depende de la temperatura y del tipo de ensayo que se realiza. En general, se puede medir la viscosidad cinemática o la dinámica. Las normas generalmente piden la viscosidad dinámica a 60°C.

✚ **Ensayo de penetración.-** La penetración es una medida de la consistencia del asfalto a la temperatura media de servicio, 25°C (Figura 37). Sus valores son dados en décimas de milímetro.

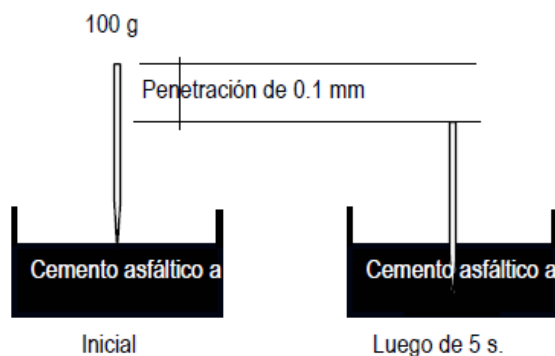


Figura 37: Esquema del ensayo de penetración. [5]

✚ **Índice de penetración.-** Este valor proporciona un criterio de medida de la susceptibilidad del cemento asfáltico a los cambios de temperatura. El índice de penetración se mide indirectamente y más comúnmente como resultado de un cálculo especial que se hace con los resultados de la penetración y el punto de ablandamiento.

✚ **Ensayo de punto de ablandamiento.-** Como los cementos asfálticos no tienen un punto de fusión definido, por ser materiales termoplásticos, se ha definido un punto de ablandamiento convencional, determinado por la temperatura a la que alcanza un determinado estado de fluidez a la cual el asfalto no puede soportar una carga de una bola de acero dentro de un anillo, por lo que la prueba también se denomina “de anillo y bola”.

✚ **Ensayo de ductilidad.-** La ductilidad es la capacidad para mantenerse

cohesionado bajo las deformaciones inducidas por el tránsito. Se mide en un equipo denominado “ductilímetro”. El ensayo consiste en someter las muestras de asfalto a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en centímetros que se estira la probeta hasta el instante de rotura.

5.1.2.2 Ensayo para determinar la durabilidad.

La durabilidad de un cemento asfáltico está determinada por el envejecimiento que sufre el material. Este envejecimiento se debe principalmente a dos factores: el proceso de mezclado en caliente en una planta de mezclado y la acción del medio ambiente durante el servicio.

El ensayo RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, Figura 38) muestra la calidad que tiene el asfalto después de fabricar la mezcla asfáltica en caliente. Al asfalto así envejecido se le realizan ensayos que buscan conocer el cambio cuando se fabrica la mezcla en caliente. Con esto, se conocen las propiedades y comportamiento del mismo en el momento en que empieza a desempeñarse como pavimento.

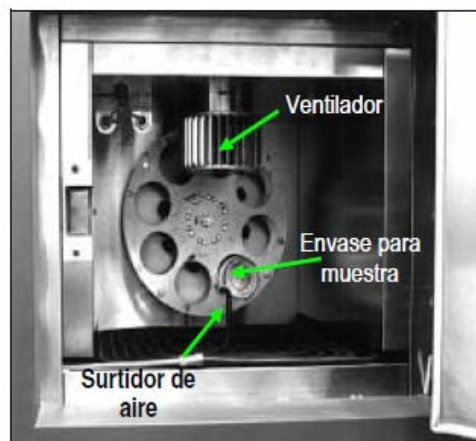


Figura 38: Horno RTFOT. [5]

El ensayo PAV (Pressure Ageing Vessel, Figura 39) es un medio para envejecer el asfalto, simulando el paso de entre 5 y 10 años en servicio. A este asfalto se le realizan pruebas para determinar la calidad que tiene el asfalto después de este tiempo.

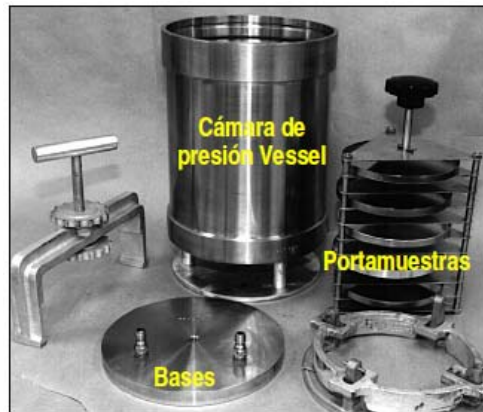


Figura 39: Equipo para el ensayo de presión de envejecimiento Vessel. [5]

5.1.2.3 Ensayo para conocer la pureza.

El cemento asfáltico obtenido de refinería tiene un porcentaje muy pequeño de impurezas como sales, carbón libre, impurezas orgánicas. Estas se deben determinar mediante el *ensayo de solubilidad* para que las propiedades del asfalto no se vean deterioradas.

5.1.2.4 Ensayos de seguridad.

Es muy importante determinar a qué temperatura puede calentarse el cemento asfáltico sin peligro de incendio, pues si se sobrepasa esta temperatura, podrían producirse vapores que en presencia de alguna de chispa se pueden incendiar.

✚ **Ensayo de punto de inflamación.-** El punto de inflamación corresponde a la temperatura a la que se puede calentar el cemento asfáltico con seguridad, sin peligro a que se inflame en presencia de llama. Sirve como prueba de seguridad en la operación de las plantas productoras de mezcla asfáltica en caliente.

5.1.2.5 Otros ensayos.

Se han ideado otros ensayos para determinar propiedades específicas necesarias para conocer y entender algunos comportamientos del asfalto. Algunos de ellos son:

✚ **Peso específico.-** Este ensayo sirve para determinar las equivalencias de pesos a volúmenes a la temperatura de aplicación, así como para algunos cálculos necesarios en el diseño de mezclas asfálticas, pues cuando se requiere emplear una cantidad determinada del material caliente, es más fácil medir volúmenes que pesos.



- + **Fragilidad.-** La fragilidad es la propiedad de romperse ante la aplicación de determinados esfuerzos. Depende fundamentalmente de la velocidad de deformación y de la temperatura.
- + **Ensayo de la mancha.-** Esta prueba se usa para detectar posibles alteraciones químicas del cemento asfáltico por efectos térmicos.
- + **Destilación.-** Con este ensayo se separan el cemento asfáltico y el diluyente para determinar su cantidad e identificarlos.
- + **Asentamiento.-** Detecta la tendencia de los glóbulos de asfalto de una emulsión asfáltica a asentarse durante el período en que la emulsión permanece almacenada y es una alerta sobre la posible inestabilidad de las emulsiones.
- + **Estabilidad para almacenaje.-** Permite hacer determinaciones de estabilidad en un tiempo corto, previendo que el cemento asfáltico o la emulsión sea la misma en cualquier sitio del tanque de almacenamiento.
- + **Tamizado.-** Sirve para detectar cuantitativamente el porcentaje de cemento asfáltico presente en las emulsiones.
- + **Capacidad de recubrimiento y resistencia al agua.-** Los objetivos de este ensayo son cubrir totalmente el agregado, soportar el mezclado sin que se rompa la película formada y resistir la acción de lavado del agua cuando se completó el mezclado.
- + **Carga de las partículas.-** Es un ensayo para determinar la carga eléctrica de emulsiones asfálticas catiónicas y/o aniónicas de rotura rápida y media.
- + **Ensayos químicos.-** Existe una fuerte tendencia a estudiar la composición química del asfalto para conocer las propiedades del material en tres momentos: en su estado original, su estado luego de pasar por la planta productora de mezcla asfáltica y luego de haber estado en servicio, hacia el final de su vida útil.

Los métodos para lograr este envejecimiento en laboratorio fueron vistos anteriormente. El ensayo RTOFT deja el asfalto como si ya hubiera pasado por la planta. El ensayo PAV envejece el asfalto, simulando cómo se encontraría luego de unos años de servicio.

Las muestras del asfalto deberán tener características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final, y deberán cumplir con los requisitos de calidad establecidos en la Tabla 810-2.1 (MTOP – 001 – F – 2002). El cemento asfáltico que deberá emplearse será de penetración 60 - 70 u 85 – 100. Los mismos deberán cumplir los requisitos que se presentan en la



Tabla 810.2.1.

Tabla 810.2.1 [14]

ENSAYOS	60-70		85-100	
Betún original	mínimo	máximo	mínimo	máximo
Penetración (25 °C, 100 gr, 5 s), mm/10.	60	70	85	100
Punto de ablandamiento A y B, °C.	48	57	45	53
Índice de penetración (*).	-1,5	+1,5	-1,5	+1,5
Ductilidad (25 °C, 5 cm/minuto), cm.	100	---	100	---
Contenido de agua (en volumen), %.	---	0,2	---	0,2
Solubilidad en Tricloroetileno, %.	99	---	99	---
Punto de inflamación, Copa Cleveland, °C.	232	---	232	---
Densidad relativa, 25 °C/ 25 °C	1,00	---	1,00	---
Ensayo de la mancha (**)	NEGATIVO		NEGATIVO	
Contenido de parafinas, %.	---	2.2	---	2.2
Ensayos al residuo del TFOT:				
Variación de masa, %.	---	0,8	---	1,0
Penetración, % de penetración original.	54	---	50	---
Ductilidad, cm	50	---	75	---
Resistencia al endurecimiento (***).	---	5,0	---	5,0

(*) El índice de penetración (IP) se determina a partir del valor de la penetración en mm/10, a 25 °C, 100 gramos y 5 segundos (Pen) y del punto de ablandamiento, °C, por el método de anillo y bola (Tab), según las expresiones siguientes:

$$A = 50 \left(\frac{\log 300 - \log Pen}{Tab - 25} \right)$$

$$IP = \frac{20 - 10A}{A + 1}$$

(**) Deberá indicarse el tipo de solvente. Si se usan solventes con xileno debe especificarse el porcentaje a emplear.

(***) La resistencia al endurecimiento es la relación entre la viscosidad absoluta a 60 °C después del ensayo TFOT y dicha viscosidad a 60 °C en el betún original (antes de la prueba).

5.2 Construcción.

En esta etapa se considera los ensayos para la mezcla asfáltica y el proceso de construcción del pavimento flexible.

5.2.1 Ensayos a la mezcla asfáltica.[13]

Es importante evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica, principalmente la susceptibilidad al agua y sus características mecánicas frente al tráfico vehicular. Algunos de los ensayos más importantes, destinados a verificar la calidad de la mezcla, se describen a continuación:

5.2.1.1 Inmersión-compresión.- Este ensayo se realiza para determinar el



efecto del agua sobre la cohesión de la mezcla asfáltica compactada. Se hace solamente a las mezclas densas, tanto en frío como en caliente.

5.2.1.2 Stripping (cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua).- Es utilizado para valorar, en forma empírica, el efecto de la acción del agua sobre la película asfáltica que recubre un agregado. Se realiza a la mezcla abierta en frío y en caliente.

5.2.1.3 Determinación cuantitativa de cemento asfáltico.- Se hace una determinación cuantitativa del cemento asfáltico en mezclas asfálticas en caliente y en muestras de pavimentos.

5.2.1.4 Ensayos dinámicos.- Estos ensayos evalúan las características dinámicas de las mezclas, su estabilidad remanente y su comportamiento a la tracción indirecta para tener una idea del comportamiento del sistema ante las cargas repetitivas.

Las mezclas asfálticas a emplearse en las capas de rodadura para vías de tráfico pesado y muy pesado deberán cumplir que: la relación entre el porcentaje en peso del agregado pasante del tamiz N° 200, y el contenido de asfalto en porcentaje en peso del total de la mezcla (relación filler / betún), sea mayor o igual a 0.8 y no superior a 1.2. Para las mezclas asfálticas deberán emplearse una de las granulometrías que se indican en la tabla 405-5.1 (MTOP – 001 – F – 2002).

5.2.2 Proceso constructivo.- Se consideran los siguientes aspectos, según [13]:

5.2.2.1 Transporte y descargue.

La mezcla asfáltica elaborada se coloca en volquetas que la transportan hasta el sitio de obra. Los dos tipos de camiones más comunes son el de vaciado por extremo y el de descarga inferior o de fondo. Los platones de las volquetas deben ser de metal y deben estar limpios, lisos y sin hoyos. La caja de metal se debe revestir con una ligera capa de lubricante para evitar que la mezcla fresca se pegue a las superficies. La mezcla se carga y se protege con el uso de lonas y/o carpas para evitar la pérdida de temperatura.

El número de camiones requeridos en una obra depende de muchos factores: la producción de mezcla en la planta, la longitud del recorrido, el tipo de tránsito encontrado en el recorrido y el tiempo necesario para descargar la mezcla.

Una vez llega a la obra, el inspector debe encargarse de medir la temperatura de llegada en la volqueta. Cuando se va a comenzar el proceso de colocación, se retira la lona y se deposita la mezcla en la tolva de la terminadora de mezcla



asfáltica, conocida también como *finisher*.

La terminadora de mezcla asfáltica debe estar lista para recibir la mezcla. La plancha debe estar caliente; para ello, cuenta con dispositivos calentadores.

- + Inspección visual.-** El inspector debe medir la temperatura de la mezcla al momento de llegar la volqueta. Se requiere una inspección visual de la mezcla para notar sus deficiencias. A continuación se mencionan algunas de ellas, que pueden requerir una inspección más rigurosa y posiblemente, una rectificación:
 - **Humo azul.-** El humo azul que asciende de la mezcla del camión puede ser un indicador de que se ha sobrecalentado la mezcla.
 - **Apariencia dura.-** Una carga que aparezca dura o presente un pico alto puede estar frío para cumplir con especificaciones.
 - **Asentamiento de la mezcla en el camión.-** Si una carga se encuentra plana, o casi plana, puede ser que contenga demasiado asfalto o demasiada humedad.
 - **Apariencia opaca y magra (seca).-** Una mezcla con estas características puede contener muy poco asfalto, o contener un exceso de finos.
 - **Vapor ascendente.-** El exceso de humedad aparece, frecuentemente, como vapor ascendente en la mezcla.
 - **Segregación.-** La segregación de agregados puede ocurrir durante la pavimentación debido a un manejo inadecuado de la mezcla o puede ocurrir antes de que la mezcla llegue a la pavimentadora.

5.2.2.2 Riegos de imprimación y de liga.

Un riego de imprimación es una aplicación de emulsión asfáltica que cubre la capa de base. Sirve para tres propósitos:

Ayuda a prevenir la posibilidad de que se desarrolle un plano de deslizamiento entre la capa de base y la capa superficial. Evita que el material de base se desplace bajo las cargas de tránsito, durante la construcción, antes de que se coloque la primera capa. Protege la capa de base de la intemperie.

Los riegos de liga son aplicaciones de asfalto (usualmente emulsiones) rociadas sobre la superficie de un pavimento existente, antes de colocar una capa de refuerzo. El propósito de un riego de liga es mejorar la ligazón entre dos capas de pavimento asfáltico. Los riegos de liga también se usan en lugares donde la mezcla en caliente entra en contacto con la cara vertical de las aceras, las cunetas y las estructuras y juntas de pavimento frío.



Es necesario conocer previamente la dosificación apropiada de aplicación de estos riegos y el tiempo de curado o rotura necesario para lograr los efectos esperados.

5.2.2.3 Colocación de la mezcla.

El proceso principal de construcción del pavimento consiste en extender la mezcla a lo largo de la vía y compactarla adecuadamente hasta la densidad mínima especificada en las normas. Se requiere gran coordinación entre la planta y el equipo de colocación para que haya un suministro continuo de mezcla.

- + **Temperatura de extensión de la mezcla.-** Una vez que esté lista la capa de soporte del concreto asfáltico y la volqueta ha descargado en la pavimentadora todo el material, se toma la temperatura en la tolva antes de su paso por las caracolas (tornillos sinfín de la terminadora) cuando va a ser extendida. Esta es la temperatura de extensión de la mezcla. La pavimentadora debe comenzar a moverse a la velocidad apropiada y a extender el material.
- + **Temperatura de compactación.-** Por ser la variable crítica al momento de compactar, es importante verificar continuamente la temperatura. La mezcla sólo puede extenderse en condiciones climatológicas adecuadas temperatura ambiente mayor a 5°C y no se puede colocar en momentos de lluvia. La temperatura de compactación es aquella que se toma una vez se ha extendido la mezcla y antes de empezar a compactar.
- + **Colocación.-** La uniformidad y continuidad de las operaciones es esencial en la pavimentación con mezclas asfálticas en caliente, por lo tanto se requiere gran coordinación de la planta con la pavimentadora y una velocidad adecuada de pavimentación. La pavimentadora (finisher) debe cargarse continuamente con suficiente mezcla y al mismo tiempo los camiones no deben esperar mucho tiempo para descargar la mezcla en la tolva.
- + **Inspección de la carpeta.-** Observando la superficie del pavimento se pueden distinguir posibles problemas:
 - **Textura superficial.-** Si se observa una textura abierta o un desgarre de la mezcla al comenzar la pavimentación, puede deberse a un calentamiento insuficiente del enrasador.
 - **Desgarre o rasgado.-** El desgarre de una mezcla ocurre generalmente cuando la mezcla está fría y aparece abierta y gruesa. También puede ocurrir por un ajuste inadecuado de la barra apisonadora del enrasador.
 - **Irregularidades en la textura.-** Ocurre generalmente por mezclas demasiado frías o con alto contenido de humedad en las mismas. Este tipo de mezcla presenta burbujeo y ampollamiento.



- **Lisura de la superficie.-** La lisura de la superficie se afecta desfavorablemente por la falta de uniformidad de las operaciones de pavimentación, las gradaciones incorrectas de agregado, las variaciones de velocidad de la pavimentadora, la operación incorrecta de los camiones y las prácticas deficientes de construcción de juntas.
- **Falta de uniformidad.-** La interrupción de la pavimentadora puede causar asperezas en el pavimento por el asentamiento de la tabla enrasadora. Los pavimentos ásperos también son el resultado de cambios en la cantidad de material depositado en frente del enrasador. El enrasador bajará su nivel si no hay suficiente material en frente y viceversa.
- **Granulometría incorrecta del agregado.-** Un exceso de agregado grueso puede resultar en una mezcla áspera, la cual produce una superficie desigual de textura áspera. El exceso de finos en la mezcla puede causar una estabilidad baja, permitiendo que se formen ondulaciones en la superficie.
- ✚ **Equipo de colocación.-** La máquina de extendido de la mezcla se llama pavimentadora o finisher. Las pavimentadoras son máquinas automotrices diseñadas para colocar mezcla asfáltica con espesor determinado y proporcionar una compactación inicial. Las dos partes principales de una pavimentadora son la unidad de potencia o tractor y la unidad de enrase.
- ✚ **Revisión previa del equipo.-** Se debe precalentar la placa emparejadora de la finisher porque si no, la mezcla se rompe y su textura parecerá abierta y gruesa, tanto como si la mezcla hubiera llegado fría. Antes de comenzar la pavimentación se deben revisar ciertos detalles para asegurar una buena operación del asfaltador.
- **Ruedas neumáticas.-** Se debe revisar la condición y presión, que debe ser la misma en las ruedas de ambos lados del asfaltador. Las presiones desiguales pueden causar movimientos indeseables en la pavimentadora.
- **Orugas.-** Se deben revisar para que estén ajustadas sin holguras.
- **Regulador.-** Si el motor no está funcionando correctamente, puede haber una falta de potencia cuando el motor se está recargando, generando fallas temporales en los vibradores o apisonadoras de la unidad del enrasador, produciendo una sección de pavimento de menor densidad o secciones con menor material que el área adyacente.
- **Tolva, compuertas de flujo y barrenas.-** Estos elementos se deben revisar para ver si presentan desgastes y estar seguros que funcionan correctamente. La velocidad del transportador y la abertura de las compuertas de flujo, se deben ajustar para que se use la cantidad necesaria de material para que las barrenas operen alrededor del 85% del



tiempo. Esto permite que se mantenga una cantidad uniforme de mezcla en frente del enrasador. Si se requiere mezcla adicional para obtener un incremento en el espesor de la capa, se deberá ajustar las compuertas de control de flujo. Las barrenas deben mantenerse tres cuartos llenas durante las operaciones de pavimentación.

- **Enrasador.-** El control del espesor de la carpeta y el control del perfil transversal de la carpeta están regulados por unidades de control que hacen parte de la pavimentadora.
Los ajustes de los controles toman tiempo en hacer efecto, cuando la pavimentadora está en marcha. Los bordes de entrada y salida del enrasador deben ser ajustados antes de empezar con el proceso de pavimentación.
- **Calentadores del enrasador.-** El enrasador está equipado con calentadores usados para calentar la placa emparejadora al comienzo de cada operación de pavimentación. Si la placa no está inicialmente caliente, la mezcla se romperá y su textura aparecerá abierta y gruesa, como si la mezcla estuviera demasiado fría.
- **Operación del enrasador.-** En la operación, el enrasador es arrastrado por el tractor. Los brazos de arrastre están pivotados generando al enrasador un movimiento flotante mientras viaja sobre la carretera. A medida que el enrasador es arrastrado, este busca el nivel que sea paralelo a la dirección de arrastre.


5.2.2.4 Compactación.

La compactación es la etapa final de las operaciones de pavimentación con mezclas asfálticas en caliente. En esta etapa se desarrolla la resistencia total de la mezcla y se establecen la lisura y la textura de la carpeta.

El proceso de compactación consiste en comprimir la mezcla con lo cual se reducen los vacíos, se aumenta la densidad y se disminuye la permeabilidad generando la resistencia necesaria de la mezcla asfáltica.

- Al comprimir las partículas del agregado, se logran dos objetivos importantes: la resistencia y la estabilidad de la mezcla.
- Al compactar la mezcla, esta adquiere estabilidad, cohesión e impermeabilidad, que se traduce en capas de rodadura resistente, durable y lisa.

Adicionalmente, la compactación cierra los espacios a través de los cuales el aire y el agua pueden penetrar y causar un envejecimiento rápido y/o desprendimiento. Sólo al compactar se logra la resistencia y la estabilidad de la mezcla.

 **Procedimiento de compactación.-** Para garantizar un correcto proceso de



compactación, se deben construir tramos de prueba, para lo cual se deben definir los siguientes aspectos: velocidad, patrón de recorrido para el ancho de pavimentación, número de pasadas, selección de la zona de operación del compactador detrás de la pavimentadora.

Para el tramo de prueba, se recomienda el siguiente procedimiento:

- Determinar la velocidad inicial del compactador.
- Tomar una medida de la densidad con equipo nuclear, durante 15 segundos después de cada pasada o recorrido de ida y vuelta, hasta que se obtenga la densidad adecuada.
- Incrementar la velocidad usando el mismo número de pasadas. Verificar con el densímetro si se mantiene la densidad adecuada. Si es así, continuar aumentando la velocidad, con el mismo número de pasadas, hasta que se obtenga la máxima velocidad que cumpla con las especificaciones de densidad al menor número de pasadas.

El patrón de compactación para la franja de prueba deberá ser el mismo patrón utilizado en la obra. Una compactación eficiente requiere que la primera pasada cubra toda la carpeta y sea realizada antes que se enfríe. Una vez extendida la mezcla, la compactación debe comenzar a la temperatura más alta posible que soporte la carga sin que se produzcan agrietamientos o desplazamientos indebidos.

La secuencia de las operaciones de compactación implica tres tipos de operaciones: compactación inicial, compactación intermedia y compactación final.

- **Compactación inicial.-** Es la primera pasada del compactador sobre la carpeta recién colocada. Se usan compactadores vibratorios o estáticos. Esta actividad se debe hacer sobre toda la carpeta.
- **Compactación intermedia.-** Para obtener la densidad requerida antes del enfriamiento de la mezcla. Con esta compactación se logran la densidad y la impermeabilidad requeridas.
- **Compactación final.-** Para eliminar marcas sobre la superficie y alcanzar la suavidad final. Generalmente se usan los compactadores neumáticos. Se hace mientras la mezcla este todavía lo suficientemente caliente para permitir la eliminación de cualquier marca de la compactación.

Es importante verificar continuamente la temperatura, por ser la variable crítica al momento de compactar.

- ✚ **Parámetros de calidad de compactación.-** La calidad del pavimento terminado depende en gran medida del éxito obtenido en el proceso de compactación. Se usan tres criterios para aprobar o reprobar una carpeta terminada. Estos son: textura superficial, tolerancia de la superficie y



densidad.

- **Textura superficial.-** Los defectos que aparezcan durante la compactación y que no puedan ser corregidos con pasadas adicionales, se deben remplazar con mezcla caliente fresca antes de que la temperatura de la carpeta que está alrededor baje hasta un punto que no sea trabajable.
- **Tolerancia de la superficie.-** Las variaciones en la lisura de la carpeta no deberán exceder 6 mm bajo una regla de 3 m colocada perpendicularmente a la línea central y 3 mm cuando esta sea colocada paralelamente a la línea central.
- **Densidad.-** Se deben hacer pruebas de densidad para determinar la efectividad de la compactación. Estas pruebas se pueden hacer removiendo un núcleo ya terminado y analizándolo en laboratorio o utilizando un densímetro nuclear, que mide la densidad directamente sobre la superficie del pavimento. La densidad debe ser mínimo del 98% de la densidad media obtenida en laboratorio, que es la densidad de referencia.

Factores que afectan la compactación.- Estos son:

- **Agregado.-** A mayor tamaño máximo de agregado o porcentaje de tamaños máximos, se requiere mayor esfuerzo de compactación para obtener la densidad de referencia. Igualmente una textura áspera del agregado resulta en una mezcla más estable y requiere de un mayor esfuerzo de compactación que una mezcla con agregados de textura lisa.
- **Asfalto.-** Para que la mezcla pueda ser compactada correctamente, el asfalto debe estar lo suficientemente fluido para que las partículas se desplacen unas respecto a las otras. El asfalto actúa como un lubricante durante la compactación. Si la temperatura del asfalto es baja, al combinarse con la llenante mineral, comienza a ligar las partículas haciendo la mezcla dura y difícil de compactar. La trabajabilidad es afectada por la cantidad de asfalto en la mezcla. A mayor contenido de asfalto, mayor es el espesor de película que envuelve al agregado, aumentando a su vez el efecto lubricante del asfalto y facilitando hasta cierto punto la compactación.
- **Temperatura de mezclado.-** La temperatura a la cual se produce la mezcla, es un indicio del tiempo que esta requiere para llegar a la temperatura mínima de compactación y por lo tanto del tiempo necesario para la compactación. Entre más caliente está la mezcla, más fluido será el asfalto y más fácil será la compactación.
- **Efectos ambientales.-** La velocidad a la cual se enfría la mezcla, afecta la duración de compactación para lograr la densidad deseada. Las temperaturas ambientales frías, la humedad alta, los vientos fuertes y las superficies frías, acortan el tiempo durante el cual se debe efectuar la



compactación.

- **Espesor de la capa.-** En general, se logra una mejor compactación con capas gruesas que con capas delgadas. Entre más gruesa la carpeta, más tiempo demora en enfriarse y por lo tanto hay más tiempo para compactar.
- ✚ **Equipo de compactación.-** Los compactadores pueden ser estáticos o vibratorios. Se debe revisar el peso total del compactador, el peso por unidad de ancho y el esfuerzo promedio de contacto. Los equipos de compactación se deben inspeccionar antes de ser usados en la obra, para verificar sus condiciones mecánicas.
- **Compactador tándem de ruedas de acero.-** Su peso varía entre 3 y 14 toneladas. Para vías de alto tráfico debe utilizarse un peso mínimo de 10 toneladas.
La presión de contacto ejercida bajo las ruedas, no debe superar la resistencia de la mezcla. Los compactadores más pesados deben ser usados sobre mezclas más estables y gruesas, especialmente en la primera pasada.
- **Compactador de ruedas neumáticas.-** Las ruedas de estos compactadores se mueven independientemente hacia arriba y hacia abajo. Lo más importante es el peso de cada rueda, el cual varía entre 1350 kg y 1600 kg para la primera pasada.
Las ruedas deben ser completamente lisas y deben estar infladas a la misma presión, permitiendo una variación máxima de 35 KPa, para que se pueda aplicar una presión uniforme durante la compactación.
- **Compactador vibratorio.-** Proporciona la fuerza de compactación mediante una combinación de peso y vibración de los rodillos de acero. Su peso varía entre 7 y 17 toneladas. La velocidad de rotación de estas pesas determina la frecuencia o vibraciones por minuto del tambor. Las frecuencias más usuales están entre 2000 y 3000 rpm. Se debe tener en cuenta la velocidad de compactación: a más velocidad, mayor será el espaciamiento entre impactos y viceversa. A mayor frecuencia, menor será la distancia entre impactos y viceversa.

La frecuencia y la velocidad del compactador deben producir por lo menos treinta impactos de vibración por cada metro de recorrido, lo cual asegura una superficie lisa. Cuando el compactador se compone de dos ejes de rodillos o tambores vibratorios, en mezclas estables y gruesas, se puede entrar con los dos rodillos vibrando, en mezclas poco estables o capas delgadas, se recomienda entrar con un solo rodillo vibrando.



CAPÍTULO VI.

6. Conclusiones y Recomendaciones.

En la presente tesina, se trata los métodos de diseño de las mezclas asfálticas para pavimentos flexibles. Para lo cual se escogió dos métodos tradicionales de diseño utilizados en nuestro país: método Marshall y el método Hveem, los cuales han sido comparados con un tercer, y actual método conocido como SUPERPAVE.

Como un resumen se puede mencionar que en el Capítulo I, se explicó algunas Generalidades sobre los métodos de diseño de las mezclas asfálticas. En el Capítulo II, se desarrolló el tema sobre los Materiales Constituyentes de la Mezcla Asfáltica. De igual manera en el Capítulo III, se expuso el tema sobre los Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas. En el Capítulo IV, se desarrolló una Aplicación Práctica de los Métodos de Diseño. En el Capítulo V, el Control de Calidad de los materiales y en la construcción y finalmente en el Capítulo VI, se exponen algunas Conclusiones y Recomendaciones del presente trabajo.

6.1 Conclusiones.

A continuación se citan algunas conclusiones a las que se ha llegado después de realizar el trabajo:

La práctica de diseño de mezclas asfálticas, ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en el laboratorio; el método más utilizado en el Ecuador es el método Marshall, ya que este método es el más tradicional y difundido en la rama de la construcción de vías y carreteras en nuestro país.

Un diseño adecuado de una mezcla asfáltica debe llevarse a cabo con los materiales que representen de la mejor manera el comportamiento de estas en la obra.

En un país en desarrollo, consultores y constructores, por razones de tipo más de tipo económico por el alto costo de ensayos de caracterización dinámicas de las mezclas, se dedican a diseñar pavimentos por los métodos tradicionales, dejando a un lado el comportamiento dinámico de las mezclas y lo que este representa en la vida útil de una carpeta asfáltica.

Es importante evaluar, estudiar y dar recomendaciones sobre cómo estos diseños tradicionales se comportan con respecto a factores dinámicos, para así sin apartarse de los diseños tradicionales poder establecer tendencias y recomendaciones para que un diseño tradicional pueda tener un mejor desempeño.

El objetivo de cualquier procedimiento de diseño de mezcla es combinar el ligante asfáltico y los agregados en una forma tal que tenga resistencia al



ahuellamiento, al fisuramiento por fatiga, al endurecimiento y a los problemas de humedad.

Para aumentar la durabilidad durante la construcción se deben controlar la segregación de la mezcla, tanto física como térmica.

La durabilidad de los pavimentos se traduce en mantenimientos y reparaciones mínimas durante su vida útil.

El compactador giratorio (método SUPERPAVE), tiene mayor versatilidad que el martillo Marshall para elaborar probetas asfálticas con diferentes relaciones de altura-diámetro, lo que permite realizar más pruebas mecánicas.

El compactador giratorio (SUPERPAVE) posee la capacidad de lograr mayores densidades que el compactador Marshall.

De los ejemplos expuestos en el presente trabajo se puede concluir que altos porcentajes de asfaltos en la mezcla, producen una reducción en la fricción interna del pavimento.

El propósito del ensayo de Hveem de diseño de mezclas es determinar la proporción apropiada de asfalto y agregado que una mezcla de pavimentación debe tener para producir un pavimento con las características deseadas. El método incluye procedimientos preliminares para identificar graduación, área superficial y la capacidad superficial del agregado. Un contenido aproximado de asfalto para la mezcla es luego calculado a partir de los procedimientos.

Posteriormente se preparan probetas de mezcla con contenidos ligeramente variables de asfalto, luego sometidas a tres pruebas el ensayo de estabilómetro, determinación de la densidad total y el ensayo de expansión. Los resultados de estos ensayos son correlacionados y usados para seleccionar el diseño de mezcla que va a exhibir las características de un pavimento óptimo.

La granulometría debe cumplir con las dos especificaciones de diseño; gráfica en escala semilogarítmica (método Marshall) y gráfica de Fuller que está elevada a la potencia 0.45 (método SUPERPAVE).

El compactador por amasado y el estabilómetro de Hveem es mucho más caro que el equipo que se utiliza en el método Marshall y no es muy transportable.

6.2 Recomendaciones.

A continuación se citan algunas recomendaciones a las que se ha llegado después de realizar el trabajo:

Tener presente la importancia de manera adecuada en el laboratorio lo que



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

ocurre en campo bajo la acción vehicular y de esta manera llegar a mezclas que muestren un mejor comportamiento en condiciones específicas de tránsito y climas.

Mejorar las especificaciones técnicas y controles de calidad en base a nuevos procedimientos constructivos, materiales, investigaciones y pruebas experimentales.

Desarrollar modelos que tomen en consideración las nuevas configuraciones de ejes y cargas.

Este trabajo debe ser complementado con la investigación y comparación de otros métodos de diseño utilizados en Ecuador, lo cual nos daría en una visión más amplia de los diferentes métodos tradicionales.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO. *Aplicación del ensayo de tracción indirecta en mezclas asfálticas en caliente para el control de calidad en carpetas asfálticas en Ecuador.*
2. CAPÍTULO 3: MEZCLAS ASFÁLTICAS. Alejandro Padilla Rodríguez.
3. CAMINOS EN EL ECUADOR. Estudio y Diseño. Ing. Antonio Salgado N.
4. INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS. Ing. Alfonso Montejo Fonseca.
5. DISEÑO MODERNO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. M.Sc. Silene Minaya González. M.Sc. e Ing. Abel Ordóñez Huamán. Segunda Edición. Lima, 2006.
6. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE. Instituto Mexicano del Transporte. "Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas". Publicidad Técnica N° 246.
7. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE. Instituto Mexicano del Transporte. "Análisis Comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de Mezclas Asfálticas". Publicidad Técnica N° 271.
8. METODOLOGÍA SUPERPAVE PARA EL DISEÑO DE MESCLAS ASFÁLTICAS. "BITUMIX CVV. Especialidades Asfálticas". Departamento de Gestión y Calidad. Julio 2005.
9. SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTE. Instituto Mexicano del Transporte. "Algunos aspectos de la Dosificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio". Publicidad Técnica N° 228.
10. ANÁLISIS DEL MÉTODO PARA EL ESTUDIO GRANULOMÉTRICO DE ÁRIDOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS. Álvaro R. Alvarado V. Santiago de Chile. Marzo 2011.
11. PAVIMENTOS. "Método Diseño Hveem". Universidad José Carlos Mariátegui.
12. ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODULO RESILIENTE Y ENSAYOS DE DEFORMACIÓN PERMANENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS DEL TIPO (MDC2) EN BRIQUETAS COMPACTADAS CON MARTILLO MARSHALL Y COMPACTADOR GIRATORIO. Juan Manuel Dávila M. BOGOTÁ, D.C. 2005.
13. CARTILLA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. ASOPAC "Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia".
14. MOP-001-F 2002. ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES. República del Ecuador. Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones.